



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID  
FACULTAD DE ECONÓMICAS Y CIENCIAS EMPRESARIALES

Grado en Gestión Aeronáutica

**Trabajo Fin de Grado**

**MODELOS DE PROPULSIÓN Y SU EVOLUCIÓN.**

**Viabilidad de las energías renovables en el sector aeronáutico.**

Marta Perea Santamaría

Tutor: Luis Rubio Andrada

Curso: 2019/2020

Madrid, junio de 2020.



## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	8
PALABRAS CLAVE .....	8
KEY WORDS .....	8
ABREVIATURAS .....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.2. JUSTIFICACIÓN E INTERÉS DEL TEMA.....	15
2. OBJETIVO .....	17
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO .....	17
3. METODOLOGÍA.....	19
4. DESARROLLO .....	22
4.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR AERONÁUTICO Y LA AVIACIÓN COMERCIAL .....	22
4.1.1. Impacto medioambiental del sector en la actualidad.....	22
4.1.2. Fases de vuelo. Consumo .....	24
4.1.3. Motores actuales. Tipos y consumo .....	26
4.1.4. Combustibles empleados en el sector.....	27
Precios del combustible.....	30
Rendimiento y eficiencia del combustible .....	31

4.2.	MODELOS DE PROPULSIÓN. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES	
		34
4.2.1.	Líneas de investigación actuales.....	34
	Biocombustibles.....	35
	Motores de hidrógeno.....	35
	Power To Liquid (PTL).....	37
	Energía fotovoltaica.....	39
	Propulsión Eléctrica.....	41
	Motores híbridos.....	42
	Otras formas de propulsión.....	42
4.2.2.	Recopilación de las características técnicas de los modelos presentados.....	43
4.3.	DESAROLLO DE LAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN CONSIDERAS MÁS VIABLES.....	44
4.3.1.	Propulsión Eléctrica.....	45
4.3.2.	Propulsión Híbrida.....	52
4.3.3.	Biocombustibles y combustibles sostenibles.....	56
	4.3.3.1. Tipos de biocombustible.....	59
	4.3.3.2. Formas de producción.....	61
	4.3.3.3. Logística y abastecimiento.....	64
	4.3.3.4. Biocombustibles Certificados. Ejemplos y Precio.....	66
4.4.	PEQUEÑO ANÁLISIS COMPARATIVO. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	68
4.4.1.	Propulsión eléctrica.....	68
4.4.2.	Propulsión Híbrida.....	69

4.4.3.	Biocombustibles.....	69
4.5.	IMPACTO EN AEROPUERTOS Y AEROLÍNEAS. EJEMPLOS .....	73
4.5.1.	Aeropuertos e infraestructuras aeroportuarias.....	73
4.5.2.	Aerolíneas y operadores aéreos.....	74
4.6.	LEGISLACIÓN APLICADA.....	77
4.6.1.	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992 (CMNUCC) .	77
4.6.2.	Protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático, 1997 .....	78
4.6.3.	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2015. Acuerdo de París	79
4.6.4.	Comité sobre la Protección del Medio Ambiente y la Aviación (CAEP) .....	79
4.6.5.	American Society for Testing and Materials (ASTM).....	81
4.6.6.	Normativa Europea. EASA.....	82
4.7	IMPACTO AMBIENTAL FUTURO DEL SECTOR. ESCENARIOS .....	84
5.	CONCLUSIÓN.....	88
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	93
ANEXOS	.....	102
ANEXO I.	Objetivos de desarrollo sostenible y el impacto de la aviación en los mismos .....	102
ANEXO II:	Proyectos de aeronaves eléctricas e híbridas .....	104

## RELACIÓN DE TABLAS Y CUADROS

Tabla 4.1: Evolución del rendimiento del combustible. ....	32
Tabla 4.2: Evolución de las mejoras de eficiencia de combustible.....	32
Tabla 4.3: Tipos de combustibles alternativos.....	34
Tabla 4.4: Comparación entre las diferentes líneas de investigación. ....	43
Tabla 4.5: Características técnicas aeronaves pequeñas.....	71
Tabla 4.6: Características técnicas aeronaves grandes aviones comerciales.....	72
Cuadro 4.1: Fórmula de Fracciones de Combustible.....	24
Cuadro 4.2: Quemado de combustible en los despegues, en función de la configuración de slaps.....	25
Cuadro 4.3: Tipos de keroseno y sus características.....	28
Cuadro 4.4: Distribución de costes las aerolíneas IATA.....	30
Cuadro 4.5: Índice de precios para el combustible de aviación según regiones.....	31
Cuadro 4.6: Especificaciones técnicas de la aeronave Alice.....	50
Cuadro 4.7: Especificaciones técnicas del X-57 Maxwell.....	51
Cuadro 4.8: Ahorro de emisiones de cada biocombustible en comparación con el JET-A1.....	61
Cuadro 4.9: Formas de producción de biocombustibles aprobadas para aviación.....	63

## RELACIÓN DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1.1. Objetivos medioambientales del sector aéreo de la IATA.....	12
Figura 1.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible. ONU.....	14
Figura 4.1. Número de vuelos desde o partiendo de aeropuertos EU28+EFTA.....	22
Figura 4.2. Emisiones de CO <sub>2</sub> de los vuelos realizados en aeropuertos EU28+EFTA.....	23
Figura 4.3: Emisiones de CO <sub>2</sub> a nivel global indicado por sectores.....	23
Figura 4.4: Emisiones de gases en cada etapa de vuelo de una aeronave.....	24
Figura 4.5: Flujo de combustible por etapas de vuelo.....	25
Figura 4.6: Código de colores y marcas utilizadas para el etiquetado de combustible.....	28
Figura 4.7: Emisiones de una aeronave de dos motores durante una hora de vuelo con 150 pax.....	29
Figura 4.8: Evolución histórica de la eficiencia de las aeronaves según el IPCC.....	33
Figura 4.9: Evolución histórica y tendencias en la eficiencia de las aeronaves.....	33
Figura 4.10: Imagen del diseño de la aeronave LAPCAT-A2.....	36
Figura 4.11: Imagen del prototipo de aeronave hipersónica HYTEX planteado por JAXA.....	37

Figura 4.12: Proceso de obtención de PTL.....	38
Figura 4.13: Imagen de Solar Impulse II. ....	39
Figura 4.14: Piper M-Class con el prototipo de Zero Avia.....	41
Figura 4.15: Tendencias ambientales mundiales sobre emisiones de CO2 y contribución de las medidas para reducir emisiones netas de CO2 de la aviación internacional. ....	44
Figura 4.16: Intensidad energética de las baterías frente al queroseno. ....	46
Figura 4.17: Diagrama de carga de pago/alcance del turbohélice Do328 frente aviones eléctricos equivalentes en función de la intensidad de las baterías. ....	47
Figura 4.18: Ecuaciones de alcance para aeronaves tradicionales y eléctricas. ....	48
Figura 4.19: Desarrollos conocidos de aviones propulsados eléctricamente. ....	49
Figura 4.20: Imagen del prototipo Eviation Alice. ....	50
Figura 4.21: Imagen de la aeronave X-57 Maxwell. ....	51
Figura 4.22: Gráfico de carga de pago/alcance para aeronaves eléctricas. ....	53
Figura 4.23: Aeronave SUGAR Volt de BOEING. ....	54
Figura 4.24: Características técnicas del SUGAR Volt. ....	54
Figura 4.25: Funcionamiento teórico de la turbina FAN del SUGAR Volt. ....	55
Figura 4.26: Prototipo E-Fan X. ....	55
Figura 4.27: Proceso de producción de combustibles sostenibles (SAF). ....	62
Figura 4.28: Producción estimada de combustibles sostenibles. ....	64
Figura 4.29: Sistema de producción y suministro de combustibles sostenibles. ....	65
Figura 4.30: Ejemplos de biocombustibles y propuestas de comercialización. ....	66
Figura 4.31: coste de producción del combustible sintético para aviones. ....	67
Figura 4.32: Canada's Bioject Supply Chain Initiative. ....	74
Figura 4.33: Ranking de aerolíneas en función de su consumo de biocombustible de 2017 .....	75
Figura 4.34: Evolución de la normativa elaborada por el CAEP. ....	80
Figura 4.35: Emisiones estimadas de CO2 a nivel mundial y de la aviación. ....	84
Figura 4.36: Previsiones de las emisiones de CO2 procedentes de la aviación internacional (2005-2050) .....	85
Figura 4.37: Emisiones de CO2 elaborado por ABBB. ....	86
Gráfico 1.1. Tres objetivos globales a corto, medio y largo plazo del sector. ....	13

## RESUMEN

---

Mediante el siguiente Trabajo de Fin de Grado, se pretende realizar una pequeña valoración sobre los tipos de combustible y otras formas de propulsión utilizadas en la aviación principalmente comercial, comparándolos con las nuevas formas de propulsión que se han ido desarrollando hasta la fecha.

Se realizará un catálogo de aquellas energías consideradas como renovables o que generan un menor impacto en el medioambiente, realizando un mayor hincapié, en aquellas más viables o realizables a nivel de inversión, tecnología, comodidad para el sector y sobre todo tiempo de implantación.

Asimismo, se intentará comentar el impacto medioambiental de las aeronaves actuales y frente a los posibles diseños de futuras aeronaves, e incluso impactos tanto sociales como económicos, de un transporte aéreo sostenible. Y finalmente se revisará a grandes rasgos, la normativa afectada.

## ABSTRACT

---

Through the following Final Degree Project, it is intended to make a small assessment of the types of fuel and other forms of propulsion used in mainly commercial aviation, comparing them with the new forms of propulsion that have been developed to date.

A catalogue will be made of those energies considered to be renewable or those that generate the least impact on the environment, with a greater emphasis on those that are most feasible at investment, technology, comfort level for the sector and, above all, implementation time.

Likewise, an attempt will be made to comment the environmental impact of current aircraft and against the possible designs of future aircraft, and even social and economic impacts of sustainable air transport. And finally the affected regulations will be reviewed in broad strokes.

## PALABRAS CLAVE

---

Aviación, cambio climático, combustible, energías renovables, impacto medioambiental, sostenibilidad, transporte aéreo.

## KEY WORDS

---

Aviation, climate change, fuel, renewable energy, environment impact, sustainability, air transport.



## ABREVIATURAS

---

- ABBB: Aviation Benefits Beyond Borders
- ACARE: Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
- ACS: Aviation Climate Solutions
- AERPL: Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y El Caribe
- APU: Unidad Auxiliar de Potencia
- ATAG: Air Transport Action Group
- BADA4: Base of Aircraft Data 4
- CAAF: Conferencia sobre la Aviación y los Combustibles Alternativos
- CAEP: Comité sobre la Protección del Medio Ambiente y la Aviación
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono
- DOE: Departamento de Energía de los Estados Unidos
- E·ESA: Agencia Espacial Europea
- EU28 + EFTA: Países miembros de la UE (28) y la Asociación Europea de Libre Comercio
- FAA: Federal Aviation Authority
- GEIs: Gases Efecto Invernadero
- HP: Horse Power
- IATA: International Air Transport Association
- IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- MTOW: Peso Máximo de Despegue
- NASA: National Aeronautics and Space Administration
- NOx: Óxidos de Nitrógeno
- OACI: Organización de Aviación Civil Internacional
- RAT: Turbina de aire de Impacto
- RTK: Revenue Tonne Kilometres
- SAF: Sustainable Aviation Fuel
- SAFG: Sustainable Aviation Fuels Guide
- SENASA: Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y Seguridad Aeronáutica
- USG: U.S Gallon
- VTOL: Vertical Take-Off and Landing
- WATS: World Air Transport Statistics



## 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 50 años, la importancia que ha adquirido el sector aéreo tanto a nivel económico, como social y político, es más que evidente. Durante ese periodo, se ha observado un crecimiento exponencial de la demanda de vuelos gracias a, entre otros motivos, el abaratamiento del precio del billete, derivado a su vez de los avances tecnológicos realizados durante los años 60 y 70 y sobre todo, gracias a la liberación y desregularización de la competencia, posibilitada por el “Deregulation Act” en Estados Unidos en 1978 (Jiménez Crisóstomo et al. 2019). Todo ello ha posibilitado que el tráfico de pasajeros aéreos a escala mundial, se haya triplicado desde 1990 (Lükewille, 2018). Es por estas y otras causas, que la aviación comercial se ha convertido en un pilar de la economía a día de hoy.

Sin ir más lejos, durante el año 2018, se transportaron aproximadamente 4 billones de pasajeros, lo que supone un crecimiento del 6,9% frente a 2017. Por otra parte, se espera que el tráfico aéreo mundial crezca la orden de un 4,6% de manera anual durante los próximos 20 años (Statista, 2019).

Su peso en la economía es tal, que según datos del informe de 2019 sobre el Desempeño de la Economía de la Industria Aérea elaborado por IATA, se espera que para el año 2020, los consumidores gasten el 1% del PIB mundial, en este sector.

Sin embargo, pese a todos los beneficios que nos ha propiciado la aviación, como cualquier actividad económica realizada por el ser humano, genera una serie de externalidades negativas para la sociedad y el planeta como son la contaminación atmosférica, acústica o incluso paisajística. Y que, a día de hoy, ponen incluso en entredicho la viabilidad del transporte aéreo. Puesto que, en un intento por preservar el medioambiente y reducir las emisiones de carbono, empiezan a cobrar importancia movimientos sociales, como el ya conocido “flight shame” o “vergüenza por volar” promovidos por figuras mundialmente notorias como Greta Thunberg (“‘Flight shame’ could halve growth in air traffic”, 2019).

Centrándonos en la contaminación atmosférica, la emisión de gases efecto invernadero, el calentamiento global y el cambio climático. El sector aeronáutico, es indudablemente responsable de al menos, la emisión de 859 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que compone el 2% de las emisiones globales, como indican en el WATS (World Aviation Transport Statistics) de 2019, elaborado por IATA. Y si la industria continua sin realizar ningún cambio, según la Agencia Europea de Medioambiente, para el año 2050

junto con el transporte marítimo, podría llegar a representar casi el 40% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (Lükewille, 2018).

Asimismo, la aviación es un sector en el que no se puede trabajar de manera aislada. Su éxito depende de la correcta actuación de los diferentes actores implicados para el lograr algo tan simple, como es el desplazamiento de personas, carga o correo, mediante la utilización de una aeronave más pesada que el aire. Entendiendo por éxito, la realización de dicho desplazamiento de manera rápida, rentable y sobre todo segura.

Por consiguiente, para poder hacer más sostenible el transporte aéreo, y lograr los objetivos propuestos por las diferentes organizaciones implicadas como por ejemplo: alcanzar la mitad de los niveles de emisión de CO<sub>2</sub> de 2005 para el año 2050, como indica IATA, las medidas planteadas para los fabricantes a través del Consejo Consultivo para la Investigación Aeronáutica (ACARE) para el año 2020, o el crecimiento neutro en carbono del sector a partir del 2020, mediante planes como CORSIA, y demás objetivos mostrados en la Figura 1.1.

Figura 1.1. Objetivos medioambientales del sector aereo de la IATA.



Fuente: Obtenida de la página web del periódico El País (2007).

Para ello, es necesario que se realicen avances en todos los campos y agentes implicados, promoviendo por ejemplo:

## MODELOS DE PROPULSIÓN Y SU EVOLUCIÓN. Viabilidad de las energías renovables en el sector aeronáutico.

- El desarrollo de la industria, avances tecnológicos en las aeronaves y sistemas de propulsión.
- El desarrollo de combustibles menos contaminantes o procedentes de energías renovables.
- El desarrollo de normativa y políticas globales por parte de los Organismos regulatorios.
- La gestión eficiente del espacio aéreo.
- La mejora de los procedimientos operativos.
- Una correcta Gestión de materiales no renovables.
- Optimización de medidas basadas en el Mercado de Emisiones, CORSIA...

Adicionalmente, y para recalcar la importancia de esta cuestión, en el siguiente Gráfico 1.1 se muestran los tres principales objetivos que debe perseguir el sector en su conjunto. Estos objetivos presentados en esta ocasión por el Air Transport Action Group (ATAG) mediante el informe Aviation Climate Solutions de 2015, incluyen además, la implicación que deben tener cada integrante del sector para su consecución, recogidos en cuatro pilares básicos.

Gráfico 1.1. Tres objetivos globales a corto, medio y largo plazo del sector.



Fuente: Obtenido del informe Aviation Climate Solutions 2015 (ATAG).

Finalmente, también cabe destacar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (mostrados en la Figura 1.2) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) también durante el año 2015, y a los que tanto gobiernos, como empresas privadas así como la sociedad en general, deben adherirse para lograr su consecución ("La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible", 2020).

Figura 1.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible. ONU.



Producido en colaboración con TROLLBACK COMPANY | [trollback.com](https://trollback.com) | +34 912 029 1010  
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: [info@trollback.com](mailto:info@trollback.com)

Fuente: Obtenida de la página web oficial de las Naciones Unidas (2020).

Estos objetivos, no solo son apoyados por la OACI, sino que además guardan una estrecha relación con al menos 15 de los objetivos estratégicos propuestos por la misma. Por tanto, el crecimiento sostenible del sector, debe tratarse como una obligación para el logro de los beneficios globales, indicados por dichos objetivos.

En el Anexo I, se muestra la relación existente entre 15 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y el sector aeronáutico, recogidos en la página Aviation Benefits Beyond Borders (iniciativa de ATAG).

Como conclusión de este primer apartado, y debido a la gran amplitud del tema a tratar, en la exposición del siguiente trabajo y con el fin de aunar el desarrollo sostenible del transporte aéreo, nos centraremos en las mejoras y avances tecnológicos realizados en el campo de los modelos de propulsión, es decir, en el desarrollo de nuevas formas de propulsión para las aeronaves, que generen una menor emisión de gases efectos invernadero y otras externalidades nocivas para el medioambiente.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN E INTERÉS DEL TEMA**

El principal motivo por el que se ha escogido este tema, es exponer la preocupación por el medioambiente, el cambio climático y el calentamiento global, tan presentes en la actualidad, partiendo desde el punto de vista del sector aeronáutico, intentando indagar en la compatibilidad de ambos.

Según se ha mencionado anteriormente, el sector de la aviación, y sobre todo la aviación comercial, es uno de los sectores claves del panorama económico actual. Su desarrollo durante el siglo XX, no solo impulsó el crecimiento económico y político de las naciones, sino que además, generó un enriquecimiento social y cultural innegable, permitiendo el acceso a lugares a los que no se podía acceder con otros medios de transporte, y siendo un elemento clave para posibilitar el desarrollo de otros sectores económicos como el turismo, e impulsar conceptos como la globalización o aldea global.

Por tanto, la justificación del presente documento se basa en la concienciación del peso atribuible a las actividades realizadas por el ser humano como causa del calentamiento global, y en cierta medida promover acciones para intentar reducir nuestra huella de carbono, y fomentar un estilo de vida más ecológico.

Por esta causa, se estima que la manera para hacer más sostenible este medio de transporte, debe provenir de la combinación entre el esfuerzo e inversión para mejorar la tecnología y los procesos operativos actuales involucrados en la aviación. Así como de la concienciación social, alentando al ciudadano, el uso sostenible de los medios de transporte, aprovechando las ventajas de la intermodalidad, o empleando el sistema de transporte óptimo para cada viaje.

Otro motivo por el que se ha escogido este tema, es tratar de primera mano, el paradigma energético del transporte aéreo, que autores como Jiménez et. al (2019) discuten y mantienen que no cambiará en las próximas décadas. Puesto que, si bien es cierto que es más que probable que su premisa se cumpla, es un tema que genera cierta curiosidad y que nos gustaría estudiar de manera más exhaustiva.





## 2. OBJETIVO

---

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

En cuanto al objetivo que se pretende alcanzar mediante la realización del siguiente Trabajo de Fin de Carrera es, por un lado **evaluar el impacto medioambiental** y el nivel de **sostenibilidad** actual del sector aeronáutico.

Centrándonos principalmente en la **aeronave**, los **avances tecnológicos** que se han ido realizando sobre la misma, y los **medios de propulsión** actuales derivados de los combustibles fósiles y aquellos más sostenibles para el sector de la aviación.

Para finalmente analizar a grandes rasgos, la viabilidad a día de hoy del uso de **combustibles alternativos y sostenibles**, no procedentes de la quema de combustibles fósiles, que sean capaces de reducir el impacto o las externalidades negativas de la aviación en materia de emisiones de gases efecto invernadero (GEI).

### 2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Por ello, se realizará en primer lugar una pequeña **evaluación de las formas de propulsión actuales** de las aeronaves comerciales más utilizadas.

En segundo lugar, se evaluarán los **modelos de propulsión mediante energías alternativas** desarrollados actualmente. Como por ejemplo la energía solar, la energía eléctrica, la pila de hidrógeno, los biocombustibles... el impacto que están teniendo y tendrán tanto en las aerolíneas como en los aeropuertos.

Se realizará un **pequeño análisis comparativo** entre todos estos nuevos medios de propulsión y frente a los combustibles fósiles.

Por otro lado, se indagará posteriormente en aquellos **modelos más viables** a nivel de costes y tiempo de implantación. Además de evaluar la posibilidad de implantación a corto, medio y largo plazo, de aquellos más desarrollados.



### 3. METODOLOGÍA

---

Mediante el siguiente apartado se pretende ilustrar el proceso y las herramientas que se han utilizado para la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado. La metodología aplicada para la realización del siguiente trabajo ha sido:

En primer lugar, se ha realizado una fase de búsqueda y recopilación de datos, mediante la lectura y el análisis exhaustivo de estudios realizados de manera previa, para formarnos una idea de la situación actual del sector de la aviación en materia medioambiental, tanto a nivel nacional como internacional.

Esta búsqueda se efectuó a través de diversas plataformas y materiales como por ejemplo:

- Por un lado, mediante el curso “Guía para la elaboración de trabajos académicos”, proporcionado por la plataforma UAMX, y junto a las indicaciones del tutor, se obtuvieron unos conocimientos básicos, para la realización de este proyecto.
- En cuanto a la información propia sobre el tema escogido, se realizó la visita de páginas webs, foros y blogs del sector, páginas web de Organismos Oficiales como AESA, OACI, SENASA, NASA, E-ESA, AENA... Portales de entidades responsables de la emisión de información como la BBC News o El País. Así como la visita a las páginas web de los principales fabricantes de aeronaves (AIRBUS y BOEING)...
- La lectura de diversos Trabajos de Fin de Grado y Trabajos de Fin de Master relacionados con el tema a tratar.
- La lectura de numerosos artículos científicos realizados por expertos de distintas materias relacionadas y encontrados en páginas como *ResearchGate*, *ABI/INFORM* de *ProQuest*, *Journal Citation Reports* o *SCOPUS*.
- La realización de visitas tanto presenciales como a través de su plataforma online, al Centro de Documentación de AENA para la consulta de libros y artículos de interés. Y la consulta de la bibliografía disponible a través de las páginas web de las Bibliotecas de la UAM.
- También se realizaron entrevistas a expertos en las materias a tratar, como Pedro García Carmelo o Abel Jiménez Crisóstomo.

- Finalmente, indicar que también han sido de especial ayuda, los conocimientos adquiridos a través de la asignatura de Impacto Medioambiental de la Industria Aeronáutica, impartida por Abel Jiménez Crisóstomo.

Cabe destacar que toda la bibliografía utilizada está referenciada y detallada en el apartado de bibliografía del siguiente trabajo.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de esta investigación es analizar, cual es el impacto actual de la aviación, cuáles son las formas de propulsión y combustibles actuales, así como las consecuencias medioambientales y económicas de su utilización.

En segundo lugar estudiaremos cuáles son los frentes o iniciativas del sector con el fin de reducir ese impacto, ya sea mediante: avances tecnológicos en las aeronaves, el desarrollo de combustibles alternativos, de tecnologías alternativas...

Y finalmente y a raíz de esa investigación, valoraremos cual es la expectativa de este sector a corto y largo plazo. Y cuáles son sus limitaciones y su desarrollo. Para poder dar una valoración objetiva y unas conclusiones sobre la situación del sector aeronáutico en materia de sostenibilidad.



## 4. DESARROLLO

### 4.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR AERONÁUTICO Y LA AVIACIÓN COMERCIAL

#### 4.1.1. Impacto medioambiental del sector en la actualidad.

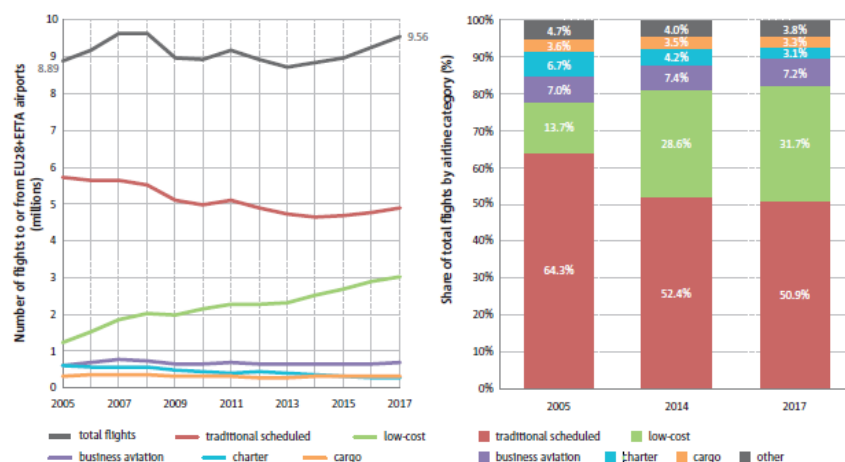
Como se ha indicado anteriormente, el sector aeronáutico genera una serie de externalidades negativas para la sociedad, que podemos ver materializadas en la contaminación acústica, paisajística y atmosférica del medio en el que se desenvuelve.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la aviación a día de hoy, es la contaminación atmosférica. Puesto que, según datos obtenidos en el informe WATS 2019 elaborado por IATA. Durante 2018, la aviación civil en su conjunto, fue responsable aproximadamente de la emisión de 859 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (IATA, 2019).

En condiciones normales, sería lógico pensar que la tendencia del tráfico aéreo y la demanda de vuelos serían crecientes. Como se puede observar en las Figuras 4.1 y 4.2, al igual que la demanda, las emisiones de CO<sub>2</sub> de los vuelos realizados en este caso, desde aeropuertos de la EU28+EFTA, ha ido en aumento desde el año 2013 (EASA Environment Report, 2019).

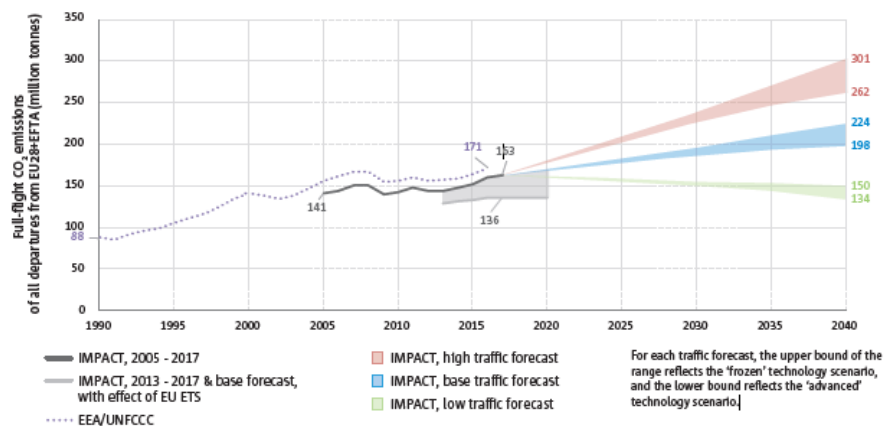
Tanto es así que durante el año 2017, el número de pasajeros fue un 50% superior a los niveles de 2005. Frente a estos datos, destacamos los objetivos de la industria para alcanzar en 2050 los niveles de emisión de 2005, lo que presenta sin duda, un gran reto.

Figura 4.1. Número de vuelos desde o partiendo de aeropuertos EU28+EFTA.



Fuente: Obtenida del informe European Aviation Environmental Report 2019 (EASA).

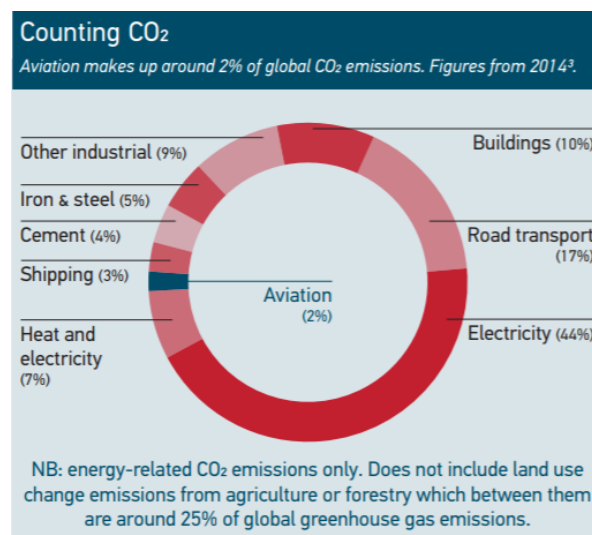
Figura 4.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> de los vuelos realizados en aeropuertos EU28+EFTA.



Fuente: Obtenida del informe European Aviation Environmental Report 2019 (EASA).

Como se puede apreciar en la Figura 4.3, sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de la aviación a nivel mundial frente a otros sectores. Si bien no es un porcentaje elevado, su reducción es necesaria para lograr los objetivos propuestos en los principales acuerdos internacionales como el Acuerdo de París.

Figura 4.3: Emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global indicado por sectores.



Fuente: Obtenida de la página web Aviation Benefits Beyond Borders (2020).

Finalmente, cabe destacar que de ese 2,1% de emisiones, el 80% corresponden a las emisiones de vuelos de menos de 1.500 km de distancia, que pueden ser cubiertos mediante otros medios de transporte posiblemente menos contaminantes, si tenemos en cuenta el número de pasajeros típico de vuelos regionales o de menos de 1.500 km ("Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #2", 2020).

#### 4.1.2. Fases de vuelo. Consumo

Como indican Benito y Benito (2012), la industria del transporte aéreo está basada en el consumo de grandes cantidades de queroseno. Sin embargo, la cantidad quemada de queroseno varía en función de las necesidades energéticas de la aeronave en cada fase de la operación. Por ello, es lógico pensar que en aquellas fases en las que la necesidad energética es mayor, la emisión de gases también lo será.

Para poder hablar de las necesidades energéticas de una aeronave, primero analizaremos a grandes rasgos, el consumo de combustible por fase de vuelo, de las principales aeronaves comerciales que están volando en la actualidad.

Adaptando de manera teórica, el cálculo del Factor de Breguet, al periodo completo del vuelo incluyendo despegue, ascenso, crucero, descenso, merodeo y aterrizaje. Se obtienen las siguientes **fracciones de combustible ( $M_{ff}$ )** mostradas en el Cuadro 4.1. Entendiendo la  $m$ , como la masa de la aeronave en función de cada fracción o etapa de vuelo (Burzlaff, 2017).

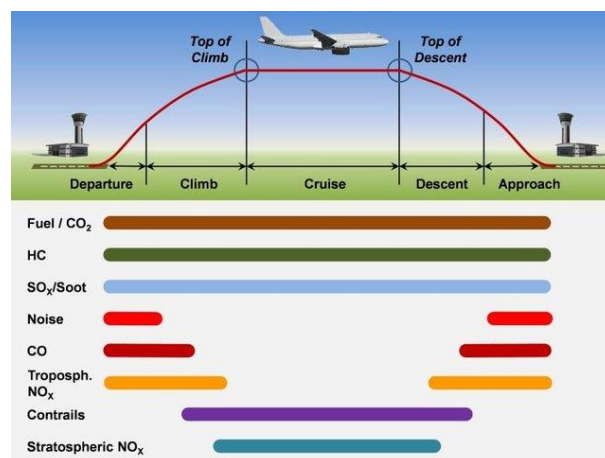
Cuadro 4.1: Fórmula de Fracciones de Combustible.

$$M_{ff} = \frac{m_{Shut\ Off}}{m_{Landing}} \cdot \frac{m_{Landing}}{m_{Loiter}} \cdot \frac{m_{Loiter}}{m_{Descent}} \cdot \frac{m_{Descent}}{m_{Reserve}} \cdot \frac{m_{Reserve}}{m_{Climb}} \cdot \frac{m_{Climb}}{m_{Descent}} \cdot \frac{m_{Descent}}{m_{Cruise}} \cdot \frac{m_{Cruise}}{m_{Climb}} \cdot \frac{m_{Climb}}{m_{Take\ off}}$$

Fuente: Obtenido del proyecto elaborado por Burzlaff (2017).

En la siguiente Figura 4.4, se muestra a grandes rasgos, la emisión de gases y ruido distribuida por etapas de vuelo.

Figura 4.4: Emisiones de gases en cada etapa de vuelo de una aeronave.

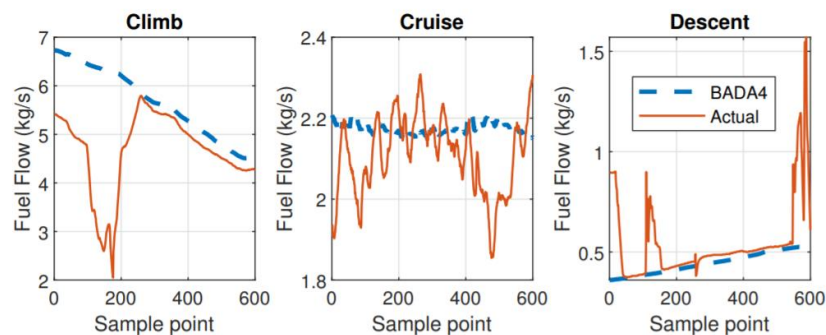


Fuente: Obtenida del artículo elaborado por Gardi, Sabatini y Ramasamy (2016).



Si lo analizamos de manera más detallada, observamos que son el despegue y ascenso, las fases en las que la aeronave consume más. En la Figura 4.5, se muestra el flujo de combustible de la trayectoria real de una aeronave y una trayectoria representada por el modelo BADA4, que abarca el comportamiento operacional de aproximadamente el 80% de las aeronaves actuales.

Figura 4.5: Flujo de combustible por etapas de vuelo.



Fuente: Obtenida del artículo elaborado por Uzun, Demirezen, Koyuncu y Inalhan (2018).

Según datos obtenidos en la página de Boeing, el combustible usado para los despegues de algunos de sus modelos comerciales, medido en kilogramos, es el siguiente (Roberson & Johns, 2008):

Cuadro 4.2: Quemado de combustible en los despegues, en función de la configuración de slaps.

AIRPLANE MODEL	TAKEOFF FLAP SETTING	TAKEOFF GROSS WEIGHT Pounds (kilograms)	FUEL USED Pounds (kilograms)	FUEL DIFFERENTIAL Pounds (kilograms)
717-200	5	113,000 (51,256)	933 (423)	-
	13		950 (431)	17 (8)
	18		965 (438)	32 (15)
737-800 Winglets	5	160,000 (72,575)	1,274 (578)	-
	10		1,291 (586)	17 (8)
	15		1,297 (588)	23 (10)
777-200 Extended Range	5	555,000 (249,476)	3,605 (1,635)	-
	10		3,677 (1,668)	72 (33)
	20		3,730 (1,692)	125 (57)
747-400	10	725,000 (328,855)	5,633 (2,555)	-
	20		5,772 (2,618)	139 (63)
747-400 Freighter	10	790,000 (358,338)	6,389 (2,898)	-
	20		6,539 (2,966)	150 (68)

Fuente: Obtenido de la página web oficial de Boeing (2020).

La relevancia de este apartado reside en que, como veremos más adelante, existe la posibilidad de combinar diversas formas de propulsión, introduciendo poco a poco aquellas consideradas como sostenibles, en las fases donde el consumo de combustible es mayor, para reducir de manera paulatina las emisiones de las aeronaves.

#### 4.1.3. **Motores actuales. Tipos y consumo**

Según datos obtenidos a través de la página web Royal Parking (2018), cuyo enlace está disponible en la bibliografía. A fecha de enero 2018, las aeronaves más utilizadas por las aerolíneas son las siguientes:

- AIRBUS A320: bimotor a reacción
- BOEING 737: bimotor de reacción
- BOEING 777: bimotor de reacción
- BOEING 727: trimotor a reacción
- AIRBUS A330: bimotor a reacción

Todas ellas, son aeronaves que utilizan **motores de reacción**. Es decir, que utilizan un tipo de combustible diferente a los motores de pistón. ("La flota mundial de aviones alcanzará las 39.000 aeronaves en 2030, según Oliver Wyamn", 2020).

Sin entrar más en detalle en cuanto a los tipos de motores a reacción, la gran apuesta de los principales fabricantes es sin duda los motores **turbofan**, que poco a poco han ido sustituyendo a los turborreactores, puesto que consumen mucho menos combustible, a la par que reducen la contaminación por emisión de gases y de ruido (Hermoso & Ramirez, 2003).

Bien es cierto que, gracias a las mejoras y avances tecnológicos de las aeronaves, a día de hoy consumen un 70% menos que hace 50 años (Benito y Benito, 2012). Ese progreso, no proviene únicamente de una mejora en la eficiencia de los motores. Sino además, de los materiales utilizados para la construcción de la aeronave. Sin ir más lejos, la quema de combustible viene principalmente dado por el peso de la aeronave, por lo que cuanto más ligera sea, menos consume y menos gases emite (Ramón Vilarasau, 2015).

Tanto es así, que según el Análisis Medioambiental de la Industria elaborado por la IATA, indica que cada generación de aeronaves es aproximadamente entre un 15-20% más eficiente que los modelos que

reemplazan. Sin embargo, también indican que mediante la utilización de los biocombustibles, se podrían llegar a reducir en un 80% los niveles de emisión actuales (IATA, 2019).

Un ejemplo de esta mejora en términos de eficiencia, sería la nueva generación de motores GTF (Geared Turbofan) de la marca Pratt & Whitney (Aviation Week Network, 2019), uno de los principales fabricantes de motores junto a las empresas General Electric en EE.UU y Rolls-Royce en Reino Unido. Estos motores, que por ejemplo llevan los nuevos Airbus A320 Neo, tienen la capacidad de reducir el consumo de combustible entre un 16-20%, evitando la emisión de aproximadamente 1,9 millones de toneladas métricas de carbono. Además, pueden conseguir una reducción de hasta el 50% de las emisiones de NOx, en referencia a las limitaciones establecidas por la normativa CAEP/6 ("Benefits - Pratt & Whitney Geared Turbofan", 2020).

Finalmente, esta reducción del consumo de combustible, también es beneficiosa para las compañías aéreas, puesto que ha permitido el ahorro de 375 millones de dólares, según indica la compañía entrevistada en el artículo (Aviation Week Network, 2019).

Otro concepto de motores que las empresas aeronáuticas están desarrollando actualmente, es el modelo **Propfan**. Un híbrido entre los motores a reacción y el motor de hélice o turboprop. Estos modelos presentan unas mejoras en eficiencia de aproximadamente un 30% respecto al año 2000 (Jiménez Crisóstomo et al. 2019). Aunque cabe destacar que debido a los retos técnicos que supone la integración de este motor en las aeronaves, no existe ningún programa de desarrollo de avión comercial que aplique esta tecnología (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).



















#### 4.1.4. Combustibles empleados en el sector

Respecto a los combustibles a día de hoy, los más usados por las aeronaves de aviación comercial son el **JET A** (en EE.UU principalmente) y **JET A-1**, basados en el queroseno para aeronaves con motores de reacción, y el **AVGAS 100 LL**, basados en gasolina para aeronaves con motores de pistón.

Aunque adicionalmente, podemos encontrar combustibles basados en gas natural como el **Gas Natural Comprimido (CNG)** o el **Gas Natural Licuado (LNG)** cuya ventaja principal, es su diferencia de coste respecto a los combustibles basados en el queroseno y la gasolina (Rofa Barragán, 2016). También existe el Carbon To Liquid (**CTL**), basado en el método Fischer-Tropsch.

En cuanto el JET A o JET A-1, sus características se muestran en el Cuadro 4.3.

Figura 4.6: Código de colores y marcas utilizadas para el etiquetado de combustible.

Fuel Type and Grade	Color of Fuel	Equipment Control Color	Pipe Banding and Marking	Refueler Decal
AVGAS 82UL	Purple			
AVGAS 100	Green			
AVGAS 100LL	Blue			
JET A	Colorless or straw			
JET A-1	Colorless or straw			
JET B	Colorless or straw			

Fuente: Obtenida de la página web Aeronautics Guide (2017).

Cuadro 4.3: Tipos de keroseno y sus características.

Grado	Jet A-1	Jet A	JP-8	JP-5
Código OTAN	F-35	----	F-34	F-44
Usos	Aviación comercial internacional	Aviación comercial en EE.UU.	Aviación militar bases	Aviación militar buques
Especificaciones	ASTM D1655 DEF STAN 91-91	ASTM D1655	MIL-T-83133	MIL-T-5624
<b>Diferencias</b>				
Punto de congelación (°C), máx.	-47	-40	-47	-46
Punto de inflamación (°C), mín.	38	38	38	60
Antioxidante	Opcional	Opcional	Opcional	Obligatorio
Desactivador de metales	Opcional	Opcional	Opcional	No usado
Antiestático	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	No usado
Inhibidor de corrosión	Opcional	Opcional	Obligatorio	Obligatorio
Antihielo	No usado	No usado	Obligatorio	Obligatorio

Fuente: Obtenido de la presentación elaborada por Pedro Carmelo García (2017).

De estas características podemos extraer que una de las principales ventajas de la utilización del JET A o JET A-1, es la **seguridad** que ofrece durante todas las fases de vuelo. Sobre todo, gracias a una serie de aditivos que le añaden para conseguir que:

## MODELOS DE PROPULSIÓN Y SU EVOLUCIÓN. Viabilidad de las energías renovables en el sector aeronáutico.

- Su punto de congelación sea de  $-47^{\circ}\text{C}$ , lo que hace que sea altamente seguro para las operaciones a altos niveles de vuelo.
- Al igual que su punto de ignición, pues es de  $38^{\circ}\text{C}$ , lo que permite que en caso de incidente o accidente aéreo, tarde más en encenderse. Mientras que su punto de autoignición es de  $201^{\circ}\text{C}$ .

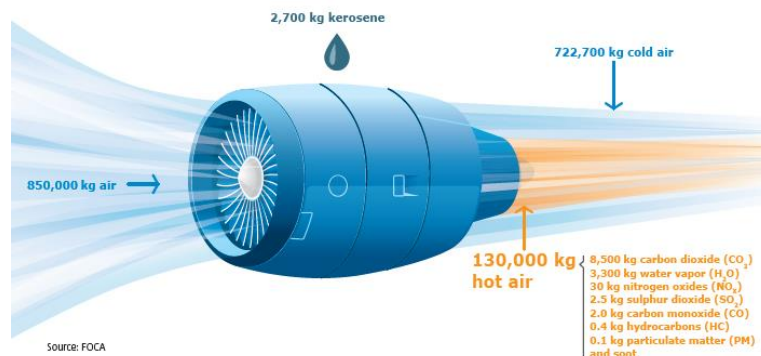
Por otro lado, y como hemos comentado anteriormente, el principal problema derivado de la utilización de este tipo de combustibles, es la emisión de los siguientes gases (Rofa Barragán, 2016):

- Dióxido de carbono
- Óxidos de nitrógeno
- Vapor de agua
- Compuestos de azufre
- Partículas sólidas visibles
- Estelas de condensación
- Formación de nubes

Sin ir más lejos, la combustión de 1 litro de queroseno, supone 2.850 kg de  $\text{CO}_2$  (Rofa Barragán, 2016). Es decir, aproximadamente por cada kilogramo de queroseno que se somete a combustión, emite la razón de 3,16 kilogramos de dióxido de carbono (Benito y Benito, 2012). Por otro lado, en relación al AVGAS, la combustión de un litro de 100 LL genera aproximadamente 2.199kg de  $\text{CO}_2$  (Rofa Barragán, 2016).

Trasladando estos datos, a un ejemplo real procedente de una aeronave comercial de dos motores, durante un vuelo de una hora de duración, obtenemos las cifras mostradas en la Figura 4.7:

Figura 4.7: Emisiones de una aeronave de dos motores durante una hora de vuelo con 150 pax.



Fuente: Obtenida del informe European Aviation Environmental Report 2019 (EASA).

Conociendo estos datos, en el año 2010 el conjunto de las aerolíneas a nivel mundial consumió la cantidad de 245.000 millones de litros de queroseno, y según indican Benito y Benito (2012), eso supone la emisión de 617 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

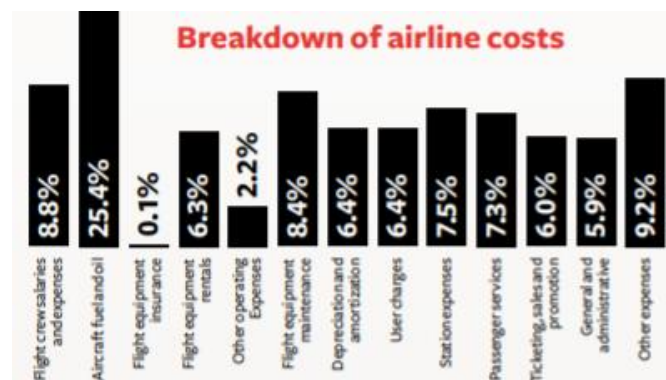
Durante el año 2018 ese consumo iascendió a los 98.29 mil barriles de Brent diarios de promedio a nivel mundial, según los datos obtenidos en la página "TheGlobalEconomy" (2020). Componiendo la cifra de 90 mil millones de USG (IATA, 2019) es decir, aproximadamente 340.687 millones de litros de queroseno.

### Precios del combustible

Uno de los principales objetivos del desarrollo de combustibles alternativos, es generar la posibilidad de reducir los costes incurridos por parte de las aerolíneas, en el consumo de combustitble.

Como se puede observar en el Cuadro 4.4, la compra de combustibles y aceites necesarios para el funcionamiento y mantenimiento de la aeronave, supone el 25,4% del total de los costes. Y el combustible de manera exclusiva, alberga el 23, 8% (IATA, 2019).

Cuadro 4.4: Distribución de costes las aerolíneas IATA.



Fuente: Obtenida del informe World Air Transport Statistics - WATS 2019 (IATA).

Este porcentaje tan elevado, deriva de los precios del combustible para aviación, que como se puede apreciar en el Cuadro 4.5, varían en función de la región en la que nos encontremos y de los precios del barril de Brent (IATA, 2019).

## MODELOS DE PROPULSIÓN Y SU EVOLUCIÓN. Viabilidad de las energías renovables en el sector aeronáutico.

De esta forma, podemos observar que en comparación con 2017, el precio medio anual nominal global del combustible, fue un 29% mayor en 2018, si lo medimos en dólares. A nivel europeo, esa diferencia fue tan solo del 22% (IATA, 2019).

Cuadro 4.5: Índice de precios para el combustible de aviación según regiones.

IATA Jet Fuel Price Index by Region (Annual Average)													
	US\$ per Barrel										% Change in:		
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Last Year	Last Two Years	Last Three Years
Global	70.9	91.4	127.5	129.6	124.6	114.8	66.7	53.8	66.8	86.1	29.0%	60.2%	29.2%
Asia Pacific	70.5	90.7	126.2	127.6	123.6	113.0	65.7	53.5	65.7	85.1	29.5%	59.1%	29.5%
Europe	71.1	91.6	128.5	130.5	125.5	115.3	66.8	53.9	67.0	86.8	29.5%	61.0%	29.9%
Middle East and Africa	68.8	88.7	124.8	126.1	121.8	111.4	63.3	51.8	64.6	83.9	29.9%	62.1%	32.6%
North America	74.0	91.6	127.4	130.2	124.5	115.6	67.5	54.2	67.2	86.4	28.5%	59.3%	27.9%
Central and South America	71.0	94.8	132.0	134.8	128.9	119.3	68.5	56.3	69.4	88.8	27.8%	57.7%	29.6%

Source: IATA/Platts Jet Fuel Price Index

Jet fuel price is average Friday price for each year

Crack Spread for Crude Oil Blends and Jet Fuel (Annual Average)											
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Europe Brent (Brent) per barrel, USD	61.5	79.4	111.2	111.6	108.6	99.1	52.6	43.8	54.3	70.8	
Brent crack spread with global jet fuel per barrel, USD	9.4	12.0	16.2	18.0	16.0	15.7	14.1	10.0	12.4	15.3	
Brent global crack with global jet fuel, %	15%	15%	15%	16%	15%	16%	27%	23%	23%	22%	

Source: IATA/Platts Jet Fuel Price Index; EIA

Jet fuel and crude price is average Friday price for each year

Fuente: Obtenida del informe World Air Transport Statistics - WATS 2019 (IATA).

### Rendimiento y eficiencia del combustible

Por otro lado, se considera relevante comentar que también se ha producido una mejora en relación a la eficiencia del combustible usado por las aeronaves (IATA, 2019).

Esta eficiencia, que se traduce en un menor consumo de combustible por kilómetro recorrido, proviene de diversos factores como una mejora en la realización de las operaciones aéreas, mejoras técnicas realizadas en los motores y los combustibles, la optimización de las rutas aéreas...

En la siguiente Tabla 4.1, se muestra la evolución del rendimiento del combustible, y se observa que si bien el número de toneladas kilómetros recorridos (TKP), así como la emisión de CO<sub>2</sub> es ascendente. Existe una reducción anual constante de la emisión de toneladas de CO<sub>2</sub> por cada mil TKP.

Tabla 4.1: Evolución del rendimiento del combustible.

Fuel Efficiency Performance	Metric	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Tonne kilometers performed	billions	679	713	738	769	814	862	917	995	1058
Commercial aviation CO <sub>2</sub>	million tonnes	663	682	691	710	733	774	812	860	905
Fuel efficiency performance	CO <sub>2</sub> tonnes per thousand TKP	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.90	0.89	0.86	0.86
Rate of fuel efficiency improvement	% change over previous period		2.0%	2.1%	1.5%	2.5%	0.3%	1.3%	2.4%	1.0%

Fuente: Obtenida del informe World Air Transport Statistics - WATS 2019 (IATA).

Adicionalmente, se muestra la eficiencia incurrida por parte de las aerolíneas en cuanto a las operaciones realizadas por las mismas. De esta manera se observa que respecto al año 2017, se produjo una mejora del 0,81% en 2018 en cuanto a litros consumidos por cada 100 ingresos-tonelada-kilometro efectuada (RTK).

Tabla 4.2: Evolución de las mejoras de eficiencia de combustible.

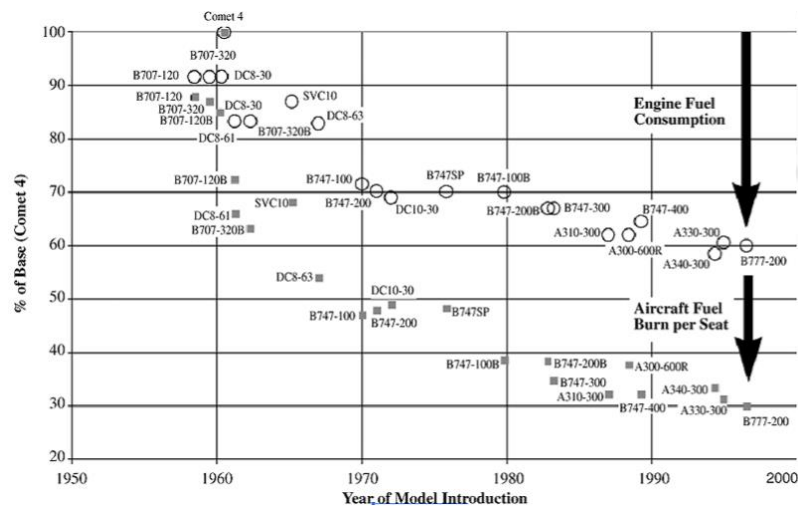
Year	Litres per 100 RTK	per RTK	Litres per 100 ATK	per ATK
2009	39.30	2.29%	25.30	1.94%
2010	37.58	4.38%	25.20	0.40%
2011	37.49	0.24%	24.69	2.02%
2012	36.85	1.71%	24.37	1.28%
2013	36.14	1.94%	23.90	1.93%
2014	35.53	1.67%	23.63	1.14%
2015	35.72	-0.52%	23.47	0.66%
2016	35.28	1.23%	23.20	1.12%
2017	34.50	2.22%	23.13	0.31%
2018	34.22	0.81%	22.92	0.89%

Fuente: Obtenida del informe World Air Transport Statistics - WATS 2019 (IATA).

Para finalizar, en la siguiente Figura 4.8, elaborada para el IPCC's Special Report on Aviation and the Global Atmosphere. Se destaca que la tendencia en la eficiencia de combustible de las aeronaves a reacción ha sido de mejora continua, hasta el punto que el combustible quemado por asiento de los aviones en la época del 2000 era un 70% menor que el combustible quemado por asiento de los primeros aviones (Peeters et al., 2005).



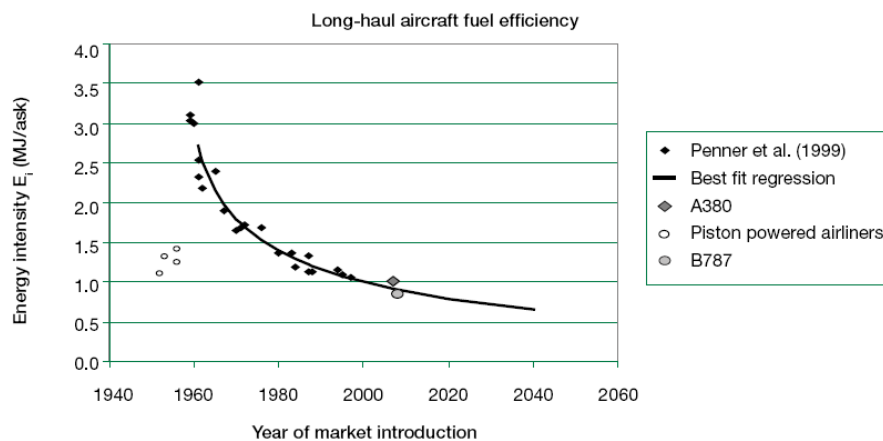
Figura 4.8: Evolución histórica de la eficiencia de las aeronaves según el IPCC.



Fuente: Obtenida del informe elaborado por Peeters et. al (2005).

Sin embargo, es importante destacar que al observar la tendencia de la eficiencia de las aeronaves, mostrada en las Figuras 4.8 y 4.9 desde el año 2000, se empieza a vislumbrar una figura de predisposición asintótica, representando la dificultad de generar mejoras marginales en la eficiencia del sistema (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Figura 4.9: Evolución histórica y tendencias en la eficiencia de las aeronaves.



Fuente: Obtenido del artículo elaborado por Jiménez Crisóstomo et al. (2019).

## 4.2. **MODELOS DE PROPULSIÓN. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Al margen de las mejoras técnicas de las aeronaves y motores actuales, durante los últimos años se han ido desarrollando diferentes líneas de investigación con el fin de alcanzar, no solo la reducción de las emisiones, sino además la reducción de los costes de combustible derivados de la propia operación de la aeronave y que como hemos mencionado anteriormente, a día de hoy suponen un **23,5%** de los costes operativos de las aerolíneas que junto a los aceites, componen el 24,6% de los costes totales (IATA, 2019). Aunque ha llegado a alcanzar aproximadamente entre el 30-35% de costes, durante el año 2012, cuando el precio del barril de Brent sobrepasaba los 100USD/barril (Benito y Benito, 2012).

### 4.2.1. **Líneas de investigación actuales.**

En cuanto a esas nuevas líneas de investigación, existen varias formas de clasificarlas. Obviando aquellas obtenidas mediante procesos geológicos, es decir los derivados del petróleo. Según Benito y Benito (2012), los diferentes combustibles alternativos se pueden clasificar en:

Tabla 4.3: Tipos de combustibles alternativos.

COMBUSTIBLES RENOVABLES	COMBUSTIBLES NO LÍQUIDOS
<ul style="list-style-type: none"><li>- Etanol (azúcar)</li><li>- Bioqueroseno</li><li>- Bio To Liquid (BTL)</li><li>- Motor de Hidrógeno (hidrólisis)</li><li>- Power To Liquid (PTL)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Energía fotovoltaica</li><li>- Pila de combustible</li><li>- Motor eléctrico</li><li>- Híbridos</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Otros (energía atómica, combustible obtenido del acero, energía eólica...)</li></ul>	

Fuente: Elaboración propia a raíz del libro de Benito y Benito (2012).

También se pueden diferenciar en **líneas de investigación sobre combustibles alternativos**, o **líneas de investigación basadas en el desarrollo de motores**. O en función de si pueden utilizarse en los motores de las aeronaves actuales, y usar los sistemas de transporte y almacenamiento existentes. Dentro de esta categoría encontraríamos los combustibles **“Drop-in”**, (que desarrollaremos más adelante) como por ejemplo el bioqueroseno y los combustibles obtenidos mediante el método Fischer-Tropsch. (Benito y Benito, 2012).

En cuanto a los tipos de **combustibles renovables** podemos destacar los siguientes:

#### Biocombustibles

Como su propio nombre indica, los biocombustibles son aquellos combustibles utilizados para los motores de combustión interna, obtenidos a través de procesos biológicos mediante materia orgánica, normalmente vegetal ("Biocombustibles para la aviación, ASTM D6866 análisis", 2020).

Sin duda alguna, los biocombustibles son la gran apuesta a día de hoy, como principal alternativa del queroseno convencional. Teniendo en cierta medida, capacidad para sustituirlo, así como para reducir hasta el 85% de las emisiones contaminantes (Rofa Barragán, 2016).

Por ese mismo motivo, en el Apartado 4.3.3 se desarrollará de manera más detallada esta línea de investigación.

#### Motores de hidrógeno

Las **turbinas de hidrógeno** son aquellas que utilizan el hidrógeno como fluido continuo para generar la energía mecánica necesaria para el desplazamiento de la aeronave.

Es importante señalar que el hidrógeno se puede obtener o bien a través de combustibles fósiles, como los hidrocarburos. O bien mediante el proceso de la **hidrólisis** es decir, por la reacción del hidrógeno con agua.

La principal ventaja del hidrógeno, además de su fácil acceso, es la energía específica en su combustión. Ya que es superior a cualquier otro combustible, siendo de 120 MJ/Kg frente a, por ejemplo los 44,6 MJ/Kg que posee el petróleo (Sarrión Fernández, 2014). Además durante su combustión, únicamente emite vapor de agua, al igual que las pilas de combustible, por lo que genera muy poca contaminación (Planelles de Pablo, 2017).

Sin embargo, si bien no se han desarrollado de manera más exhaustiva es debido a los problemas derivados de su producción, almacenamiento y transporte en tierra. Y sobre todo, por la seguridad que pueden ofrecer, ya que esta es mucho menor a la generada por los combustibles convencionales (Sarrión Fernández, 2014).

Otro motivo por el que no se ha considerado como viable la utilización del hidrógeno para la aviación es que a día de hoy, para poder usarlo, se tiene que mantener en condiciones criogénicas. Pues su punto

de ebullición es de  $-253^{\circ}\text{C}$ . Además, si bien es cierto que su capacidad para generar energía por unidad de peso, es cuatro veces mayor frente al queroseno, su capacidad por unidad de volumen es cuatro veces menor, lo que obligaría a considerar depósitos muy grandes en las aeronaves. Finalmente, si comparamos el balance energético total de energía consumida en la fabricación de combustible, en comparación con la que genera, es negativo. (Benito y Benito, 2012)

A pesar de ello, existen proyectos en los que se plantean diseños de aeronaves que utilizan este medio de propulsión, como por ejemplo:

**Proyecto LAPCAT II**, (Rofa Barragán, 2016) un proyecto para diseñar una aeronave hipersónica capaz de alcanzar velocidades entre Mach 4 y 8. Fue iniciado en 2008 y financiado por la Comisión Europea, involucra al menos a 16 empresas de 6 países europeos diferentes. Esta aeronave en concreto, se ha diseñado con el objetivo de unir dos puntos del globo diametralmente opuestos en cuatro horas o menos ("CORDIS | European Commission", 2019). Entre sus principales características podemos destacar que mediante un motor de hidrógeno, alcanzaría la velocidad de Mach 5, y sería capaz de transportar hasta 300 pasajeros ("LAPCAT II", 2019).

Según indican en la página de la Agencia Espacial Europea (E-ESA), estos diseños estarían realizando vuelos civiles para el 2030.

Figura 4.10: Imagen del diseño de la aeronave LAPCAT-A2.



Fuente: Obtenida del blog Desarrollo Defensa y Tecnología Bélica (2015).

El **Proyecto HYTEX** realizado por la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), está impulsado también por un turborreactor alimentado mediante hidrógeno líquido criogénico (Rofa Barragán, 2016). Con un objetivo similar al del proyecto LAPCAT II, se trataría de una aeronave para 100 pasajeros, que alcanzaría velocidades comprendidas entre Mach 3 y 5. Los tanques de hidrógeno líquido se encontrarían en el morro y en la parte trasera de la aeronave, y el centro de gravedad se movería usando los tanques de combustible, proporcionando estabilidad (Research and development on hypersonic turbojet engine, 2019).

Figura 4.11: Imagen del prototipo de aeronave hipersónica HYTEX planteado por JAXA.



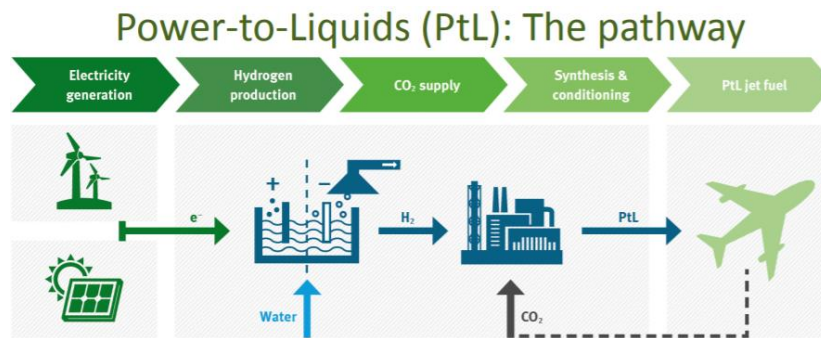
Fuente: Obtenida de la página web oficial de JAXA (2020).

### Power To Liquid (PTL)

El concepto de los combustibles Power To Liquid o Power To Fuel se basa en obtener combustibles líquidos a partir de fuentes de energía renovables, como la energía eólica o la energía solar.

Concretamente, su obtención se realiza mediante varias fases, mostradas en la Figura 4.12. En la primera, se obtiene hidrógeno a partir de fuentes de electricidad renovable mediante la electrólisis del agua. Después se produce la conversión de CO<sub>2</sub> junto al hidrógeno obtenido, y finalmente se produce la síntesis de hidrocarburos líquidos, que posteriormente se mejoran y se refinan ("Potentials of Power-to-Liquid fuels in aviation", 2020).

Figura 4.12: Proceso de obtención de PTL.



Fuente: Obtenida de la presentación Power To Liquid. Seminar on Alternative Fuels - OACI (2017).

Una de las principales ventajas de los PTL, es que al proceder de la energía eléctrica, el consumo de agua necesario para su producción, es mucho menor que la necesaria para la obtención de biocombustibles a partir de biomasa. Otra ventaja que presenta frente a estos, es que su tasa de conversión es mayor, por lo que para una misma hectárea de producción, requiere una menor demanda de espacio. (Weindorf et al., 2016)

Sin embargo, los PTL requieren unos costes de producción muy elevados en comparación con otros biocombustibles y el Jet-A1, lo que genera que económicamente no sean eficientes (Roth & Schmidt, 2017).

Los combustibles PTL que se suelen obtener mediante este proceso se pueden introducir, en principio, directamente en los motores de las aeronaves. Son combustibles "Drop-In" ("Potentials of Power-to-Liquid fuels in aviation", 2020).

Sobre los **combustibles no líquidos**, podemos destacar que difieren de los combustibles mencionados anteriormente en que principalmente, son métodos para generar electricidad.

### Energía fotovoltaica

El diseño se basaría en introducir paneles solares fotovoltaicos en una aeronave, con el objetivo de utilizar la energía solar de manera directa para mantener el avión en vuelo durante el día, y desde las baterías que almacenan la energía por la noche o cuando no hubiera disponible luz solar.

En algunos de los prototipos presentados hasta el día de hoy, la instalación de los paneles solares se realizaría en la superficie alar de las aeronaves. Puesto que evita la posibilidad de que haya una menor incidencia solar en los días nublados (Planelles de Pablo, 2017).

El principal problema que presenta la energía fotovoltaica, es que la tasa de conversión en corriente eléctrica es demasiado baja. Es decir, la relación energía producida por unidad de peso, debería ser necesariamente mayor, para poder utilizarse en la aviación comercial.

Sin embargo, existen modelos como el **Solar Impulse II** (Figura 4.13) fabricado con fibra de carbono y 17.248 células solares. Cuenta con cuatro baterías de ion-litio para almacenar la energía solar, y genera una potencia media de 15 CV. Cabe destacar que tiene una envergadura de 72 metros, (la envergadura del Airbus A380 es de 80 metros), pesa 2,3 toneladas y alcanza una velocidad media de 75 kilómetros por hora (El País, 2016).

La importancia de este modelo, reside en que, a pesar de ser una aeronave monoplaza, en el año 2015 fue el primer avión propulsado mediante energía solar capaz de volar tanto de día como de noche ("Solar Impulse - Around the world to promote clean technologies", 2020).

Figura 4.13: Imagen de Solar Impulse II.



Fuente: Obtenida de la página web oficial de Muy Interesante (2016).

En el año 2019, el Solar Impulse II fue adquirido por la empresa española Skydweller con la intención de fabricar aeronaves no tripuladas impulsadas mediante energía solar, siguiendo el diseño de esta (Monteagudo, 2019).

Adicionalmente podemos destacar la empresa H55, que realiza diseños de aeronaves eléctricas basadas en el Solar Impulse II. Finalmente, también se ha considerado el uso de la energía fotovoltaica, como parte del proceso de producción de combustibles PTL.

### Pila de combustible

Las pilas de combustible, convierten la energía química de un combustible en electricidad, a partir de una reacción química de iones de hidrógeno, con algún agente oxidante como el oxígeno. (Rofa Barragán, 2016).

La principal diferencia con una batería, es que están diseñadas para poder ser reabastecidas continuamente. Además, la pila de combustible no es contaminante, pues la reacción de hidrógeno y oxígeno tan solo produce emisiones de vapor de agua (Rofa Barragán, 2016).

En el año 2008, se efectuó en Ocaña (Toledo) el vuelo del primer avión propulsado mediante una pila de combustible, concretamente de hidrógeno.

Si bien es cierto que son energéticamente eficaces, aún no están lo suficientemente desarrolladas como para producir la energía por unidad de peso suficiente para mover una aeronave comercial.

Sin embargo, existen diversas aplicaciones aeronáuticas para las pila de combustible, como por ejemplo en forma de APU o RAT (Benito y Benito, 2012). Sin ir más lejos, la compañía AIRBUS está desarrollando la investigación en pilas de combustible para la producción de energía auxiliar, sustituyendo a los actuales APU, con el consecuente ahorro de combustible, además de la reducción de las emisiones de ruido en el propio aeropuerto (Rofa Barragán, 2016).

Un ejemplo de pilas de combustible, podría ser el presentado por la empresa americana ZeroAvia.

Este diseño está enfocado en el segmento de vuelos de corto recorrido. Es decir, de menos de 1.000 millas. Esta empresa, ha diseñado un tren motriz con la intención de producirlo a partir del año 2022. La intención de esta empresa es fabricar posteriormente aeronaves, para recorridos de 300 a 500 millas, con capacidad de 10 a 20 pasajeros (ZeroAvia, 2020).



Actualmente, están probando su prototipo en la célula de una aeronave Piper M-Class que tiene un peso de 2 toneladas y capacidad para seis asientos en su modalidad ejecutiva. Según indican en la página AviationPros (2019), es la aeronave de emisiones cero más grande que existe a día de hoy. Pues a principios de 2019, la FAA emitió el Certificado Experimental de I+D para la modificación de la aeronave Piper M-Class con este motor ("ZeroAvia Emerges From Stealth With the Largest Zero-Emission Airplane Flying Today", 2019).

Figura 4.14: Piper M-Class con el prototipo de Zero Avia.



Fuente: Obtenida de la página web AviationPros (2019).

No obstante, este motor podría incluirse en aeronaves de diversas aplicaciones como taxi aéreo, agricultura, usarse en una aeronave no tripulada, carga aérea...

### Propulsión Eléctrica

En cuanto a la propulsión eléctrica, existen diferentes grados de desarrollo en función del tamaño de la aeronave. Como comentaremos más adelante en el Apartado 4.3.1, el principal problema de la propulsión eléctrica, es la densidad energética de las baterías actuales. Ya que necesariamente debe ser mayor para poder propulsar aeronaves usadas en aerolíneas comerciales.

No obstante, existen números prototipos de aeronaves eléctricas e híbridas, y otras que incluso están certificadas y comercializadas. Recogidas en una tabla elaborada por OACI en mayo de 2019, que se muestra en el Anexo II.

### Motores híbridos

Los motores híbridos tienen un funcionamiento similar a los motores de automóviles, combinando el consumo de combustible convencional con energía eléctrica. De esta manera para poder realizar el despegue y aterrizaje, se usaría el combustible, y durante el resto de fases se utilizaría la propulsión eléctrica (Planelles de Pablo, 2017).

Al considerarse como una de las líneas de investigación más viables, el desarrollo de los motores híbridos se realizará en el Apartado 4.3.2.

### Otras formas de propulsión

#### - Combustible derivado del acero

Es una propuesta realizada por la empresa LanzaTech, por la que se pretende aprovechar los gases derivados de la producción industrial, en beneficio de la aviación. La técnica se basa en capturar y reutilizar el carbono, para reciclar el monóxido de carbono y convertirlo en fuel. La empresa estima que se podría aplicar al 65% de las acerías (Aviation Climate Solutions, 2015).

#### - Energía atómica

Queda evidente la posibilidad de descartar esta forma de propulsión, puesto que aunque es técnicamente realizable, los problemas de seguridad imposibilitan su utilización para la aviación comercial.

#### - Energía eólica

Uno de los principales usos que se han valorado, ha sido la utilización de la energía eólica de manera complementaria a las placas solares para intentar recargar las baterías.

Otro uso de la energía eólica es la producción de los combustibles PTL, mencionados anteriormente.

#### 4.2.2. Recopilación de las características técnicas de los modelos presentados.

En la siguiente Tabla 4.4, se han recogido las principales características de los modelos de propulsión mostrados en el apartado anterior, y los prototipos y empresas mostradas. Comparando las características técnicas de cada línea de investigación.

Tabla 4.4: Comparación entre las diferentes líneas de investigación.

	Autonomía	Pax	Carga de pago	Contenido energético	Densidad energética
JET-A1 <sup>1</sup>	8056 Km	14	2630,8 Kg	42,8 MJ/Kg	34,7MJ/L
PowerToFuel <sup>2</sup>	N.A.	N.A.	N.A.	140 MJ/Kg	≈ 10 MJ/L
Hidrógeno líquido	N.A.	300	N.A.	120 MJ/Kg	≈ 9,36 MJ/L
Fotovoltaica <sup>3</sup>	Hasta 8774 km	2	N.A.	1,44 – 3,88 MJ/Kg	3,6 – 8,92 MJ/L
Pila de combustible <sup>4</sup>	800 km	10 - 20	< 544 Kg	662 Wh/kg	≈ 9,36 MJ/L

Fuente: Elaboración propia a raíz del Apartado 4.2.1.

Sobre los datos del uso de energía fotovoltaica, se han tomado las especificaciones técnicas de una **batería de ion-litio**, multiplicada por 4 al tener el modelo Solar Impulse II, cuatro baterías.

Sobre la carga de pago máxima en la propulsión de la pila de combustible, se ha tomado la capacidad máxima del modelo Piper M-Class sobre el que se ha realizado el prototipo de ZeroAvia. Por ello se estima, que en función del peso de la pila de combustible, la carga de pago máxima no superará los 544 Kg.

En cuanto a la densidad energética, se han tomado como referencia los datos del hidrógeno líquido (Baeza, 2012).

<sup>1</sup> Datos obtenidos de las propiedades físicas para Jet-A1.

<sup>2</sup> PowerToFuel (Roth & Schmidt, 2017).

<sup>3</sup> Datos mostrados en base al prototipo Solar Impulse II.

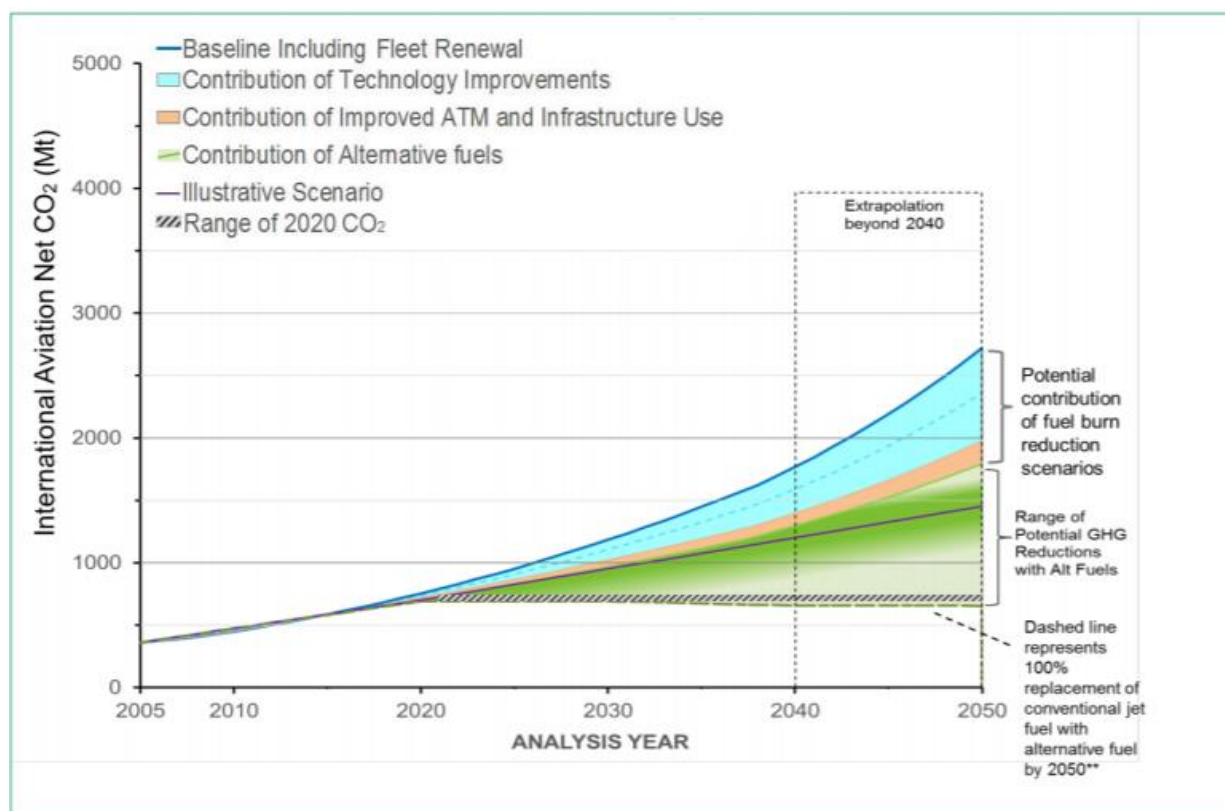
<sup>4</sup> Datos mostrados en base al motor presentado por ZeroAvia.

#### 4.3. DESARROLLO DE LAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN CONSIDERAS MÁS VIABLES

Para poder lograr los objetivos medioambientales globales y promover el crecimiento sostenible de la aviación comercial. Tras realizar una valoración de las medidas de propulsión que pueden ayudar a alcanzar esos objetivos, y siguiendo las contribuciones de las medidas mostradas por OACI en la Figura 4.15. Aquellas relacionadas con los sistemas de propulsión de las aeronaves son: **la propulsión eléctrica**, **la propulsión híbrida** y sobre todo, los **biocombustibles**.

Por ello, en el siguiente apartado, y pese a los potenciales que presentan las otras líneas de investigación. Se centrará en las investigaciones y avances realizados en la energía eléctrica, los modelos híbridos y los biocombustibles para la aviación.

Figura 4.15: Tendencias ambientales mundiales sobre emisiones de CO<sub>2</sub> y contribución de las medidas para reducir emisiones netas de CO<sub>2</sub> de la aviación internacional.



Fuente: Obtenida del informe Sustainable Aviation Fuels Guide 2018 (OACI).

#### 4.3.1. Propulsión Eléctrica

Como indican Jiménez Crisóstomo et al. (2019) “la mayor utilización de las energías renovables, requiere una mayor electrificación de los sistemas y en particular de la aeronave”.

Según indica la OACI, los proyectos de aeronaves tanto eléctricas como híbridas, se pueden clasificar en los siguientes grupos ("Electric and Hybrid Aircraft Platform for Innovation (E-HAPI)", 2020):

- **Aviación general o aviación de recreo:** se trata de aeronaves con un MTOW entre 300 kg y 1000 kg aproximadamente. Con una capacidad máxima de 2 personas. En esta categoría se incluyen la mayoría de las aeronaves que actualmente están certificadas y en producción.
- **Aviación regional y de negocios:** este grupo abarca las aeronaves destinadas a realizar vuelos de no más de 1.000 km, con una capacidad aproximada de 10 asientos.
- **Aviación comercial:** en esta categoría entrarían las aeronaves para la realización de vuelos comerciales, con capacidad para 100-135 pasajeros. Adelantamos que, según indica OACI este tipo de aeronaves no entrarían en servicio antes de 2030.
- **Aeronaves VTOL:** se trata de aeronaves de despegue vertical. Tienen un MTOW comprendido entre los 450 kg y 2.200 kg y una autonomía para 300 km máximo. Este tipo de aeronaves muy posiblemente entrarán en servicio en los próximos cinco años.

Si bien es cierto que el desarrollo de aeronaves eléctrico-híbridas es actualmente precario, ya existen modelos certificados y comercializados que pueden utilizarse perfectamente en aviación general o aviación privada. Pues como comentaremos más adelante, se trata de aeronaves con capacidad para 4 - 8 personas máximo. Son las denominadas “Very Light Jet”, que hacen referencia a aquellas aeronaves con un MTOW inferior a 4.540 kg (Clarke, 2018).

Pese a la dificultad o reto tecnológico que plantea la mejora de la densidad energética de las baterías actuales. Si bien se siguen desarrollando prototipos y proyectos de aeronaves eléctricas, es por un concepto sencillo pero económicamente importante: la **descongestión del tráfico aéreo**.

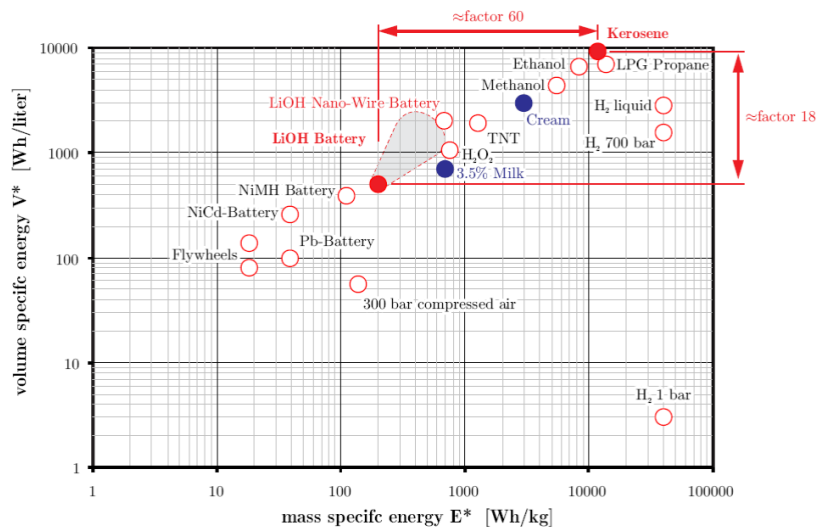
Gran parte, por no decir la mayoría de esos proyectos, están enfocados a la creación de aeronaves de 1 a 19 pasajeros, que posiblemente se materialicen en los próximos 5-10 años ("Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #5", 2020).

El principal problema de la propulsión eléctrica, como se muestra en la Figura 4.16, reside en que para una misma cantidad de energía, el **peso** de las baterías debe ser del orden de **60-70 veces** el del

queroseno necesario, y el **volumen** de las baterías sería **18 veces** mayor al del queroseno equivalente (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Por ello, el futuro de la propulsión eléctrica, reside en el desarrollo de estas baterías, albergando una mayor capacidad de almacenamiento de energía por unidad de volumen y aligerando el peso de la aeronave. Según aumente la densidad energética de las baterías, veremos más materializada, la idea de aeronaves eléctricas para aviación comercial ("Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #5", 2020). Otro hecho a tener en cuenta, es que el peso de esas baterías, a diferencia del combustible, es constante durante la realización de todo el vuelo, lo que reduce la autonomía de la aeronave (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Figura 4.16: Intensidad energética de las baterías frente al queroseno.

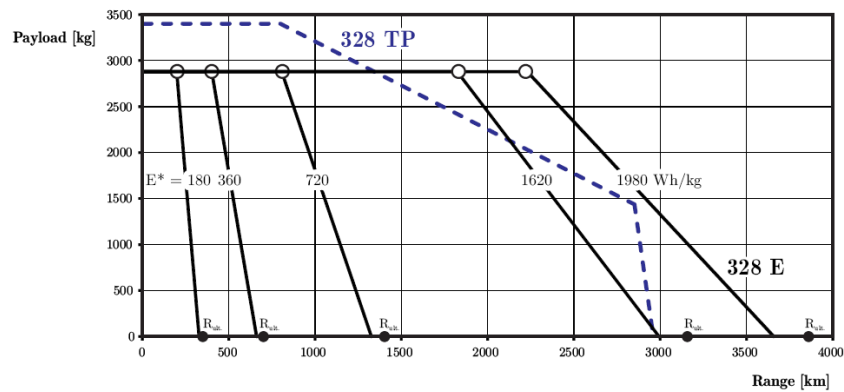


Fuente: Obtenida del artículo elaborado por Jiménez Crisóstomo et al. (2019).

Este problema que presenta actualmente el diseño del avión eléctrico, radica en la relación mostrada en el **diagrama de carga de pago/alcance**. Pues esta relación debe maximizarse todo lo posible. Esto es, reducir el peso de las baterías y la densidad de la energía de la electricidad almacenada ("Efficient technology. Electric Aircraft", 2020).

Siguiendo el ejemplo propuesto por Jiménez Crisóstomo et al. (2019), en la Figura 4.17, se comparan las combinaciones del diagrama de carga de pago/alcance de la aeronave Dornier Do328, y las potenciales alternativas del avión eléctrico bajo diferentes hipótesis de intensidad energética de las baterías expresadas en Wh/Kg. Sabiendo que la capacidad de las baterías actuales es de 180 Wh/kg.

Figura 4.17: Diagrama de carga de pago/alcance del turbohélice Do328 frente aviones eléctricos equivalentes en función de la intensidad de las baterías.



Fuente: Obtenida del artículo elaborado por Jiménez Crisóstomo et al. (2019).

Por tanto, la intensidad energética que proporcionan las baterías actuales debería ser **cinco veces mayor**, para aviones regionales, y **diez veces mayor** para igualar el diagrama de carga de pago/alcance de una aeronave actual (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Si bien no se ha desarrollado de manera más exhaustiva el avión eléctrico, es debido a que la integración de las baterías requiere cambios más que notables en los diseños de las aeronaves, tanto a nivel aerodinámico, como distribución de masas y centro de gravedad, controles de vuelo, estabilidad, etc. (Jiménez Crisóstomo et al. 2019). Y como se muestra en el ACS, los principales fabricantes de aeronaves, han apostado por la modificación y mejora de las aeronaves actuales para hacerlas más eficientes (Aviation Climate Solutions, 2015).

Adicionalmente, tal y como indican Jiménez Crisóstomo et al. (2019) al simular en una aeronave convencional para el transporte aéreo comercial, el uso de propulsión eléctrica en vez combustible. Si se mantuviera el peso máximo del avión y las características aerodinámicas similares, mediante el uso de las ecuaciones para el cálculo del alcance de aeronaves eléctricas, y comparándolas con las ecuaciones tradicionales de Breguet para las aeronaves de turbina, mostradas en la Figura 4.18, se estima que el alcance que tendría una aeronave eléctrica con características similares al B737-800 con 162 pasajeros sería únicamente de 73,2 millas náuticas (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Figura 4.18: Ecuaciones de alcance para aeronaves tradicionales y eléctricas.

**Breguet Range Equation**  
(level flight: does not include take-off & climb; no fuel reserves)

Jet engine aircraft: 
$$R = \underbrace{\eta_{total}}_{\substack{\text{Propulsive Power} \\ \text{Fuel energy / time}}} \frac{H}{g} \frac{L}{D} \ln \left( \frac{m_{initial}}{m_{final}} \right)$$

All-electric aircraft: 
$$R = \underbrace{\eta_{total}}_{\substack{\text{Propulsive Power} \\ \text{Battery Power}}} \frac{E}{g} \frac{L}{D} \frac{m_{Battery}}{m_{Aircraft}}$$

R: Range  
H: Fuel energy content  
E: Battery specific energy  
L/D: Lift-to-drag ratio  
m: Mass

Fuente: Obtenida del artículo elaborado por Jiménez Crisóstomo et al. (2019).

Sin embargo, desde hace unos años empezamos a vislumbrar el uso de la energía eléctrica, en sustitución del queroseno. Por ejemplo, tradicionalmente el trayecto que recorría la aeronave desde la terminal hasta la pista de despegue para iniciar el vuelo, se realizaba usando los motores de la propia aeronave, lo que supone la emisión de gases y contaminación acústica. En 2015, la ATAG publicó en el ACS, la creación del EGTS Internacional, un Joint Venture de las empresas Honeywell y Safran, que crearon el **sistema EGTS** que se compone de unos motores eléctricos instalados en los trenes de aterrizaje principales de la aeronave (Aviation Climate Solutions, 2015).

De esta manera, al otorgar autonomía eléctrica a la aeronave en tierra, se elimina el consumo de combustible en la primera fase de vuelo, estimando la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> un 61%, las emisiones de NOx un 51%, los hidrocarburos no quemados un 62% y el CO hasta un 73%, respecto a una operación convencional (Aviation Climate Solutions, 2015).

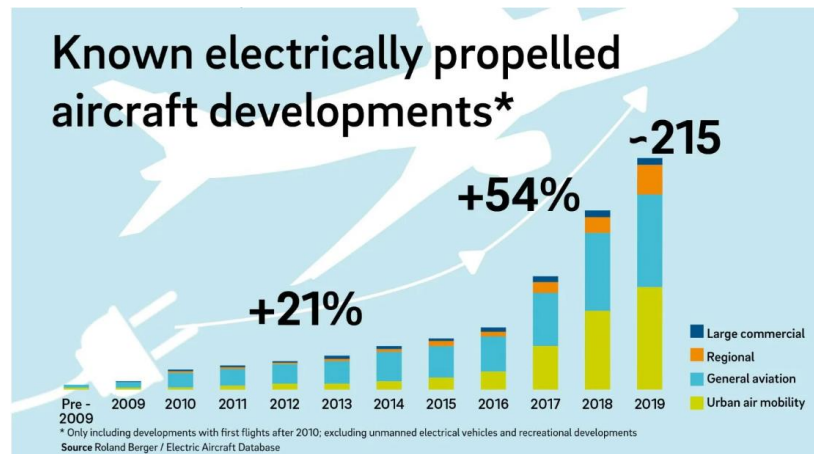
Finalmente, según datos obtenidos en la página web Aviation Benefits Beyond Borders (ATAG), a corto plazo veremos la propulsión eléctrica como parte de la transición energética del sector. Sin ir más lejos, en febrero de 2020, existían aproximadamente 200 proyectos para poner en funcionamiento una aeronave eléctrica o híbrida. Y según indica la consultora Roland Berger, el número de desarrollos de aeronaves eléctricas subió un 30% en 2019 (Thomson, 2020). La distribución de los tipos de proyectos de aeronaves eléctricas, se muestra en la siguiente Figura 4.19.

De esa distribución, entre el 40-45% pertenece al denominado “taxi aéreo”, seguido de proyectos destinados para aviación general. Es decir, aeronaves encaminadas a realizar vuelos regionales o de



corto alcance (Thomson, 2020). Según indica la ATAG, estas aeronaves podrían estar en servicio para el año 2035 ("Efficient technology", 2020).

Figura 4.19: Desarrollos conocidos de aviones propulsados eléctricamente.



Fuente: Obtenida de la página web oficial Roland Berger (2020).

En cuanto a ejemplos de los algunos de esos proyectos sobre aeronaves eléctricas, podemos destacar la empresa **Eviation Aircraft**. La compañía israelí presentó durante 2019, su prototipo "ALICE". Esta aeronave, es posiblemente uno de los prototipos más potentes en la actualidad.

Alguna de las características que podemos destacar de esta aeronave, son su batería de ion-litio de 920 kWh, con un peso de 3.600 kg. Lo que supone poco más del 60% del MTOW total. Tiene capacidad para 9 pasajeros más 2 de tripulación. Y según indican en su página web, 1.134kg de carga útil. Como se indica en el Cuadro 4.6, tiene un alcance aproximado de 1.000km, más 45 minutos de reserva. Y alcanza una velocidad crucero de 440 km/h ("AIRCRAFT | Eviation", 2020).

Se compone de tres motores de hélices, de 275kW. Su primer vuelo está previsto en principio para 2020 ("AIRCRAFT | Eviation", 2020). Y esperan la certificación por parte de las autoridades en dos o tres años.

Por otro lado, plantean dos modalidades de aeronave, una empleada como taxi aéreo, y otra con configuración ejecutiva.

Frente a una aeronave de características similares propulsada mediante combustible, cabe destacar que la aeronave eléctrica mantiene unos costes directos por hora de vuelo relativamente menores. Esto es debido a la simple eliminación del coste de combustible, puesto como indicábamos anteriormente, suele componer el 23,8% de los costes operacionales.

Figura 4.20: Imagen del prototipo Eviation Alice.



Fuente: Obtenida de la página web Clipset (2019).

Cuadro 4.6: Especificaciones técnicas de la aeronave Alice.

PERFORMANCE		CHARACTERISTICS	
Cruise speed	240 KTAS	Occupants	9 Pax (+2 crew)
Takeoff field length	3,000' / 914 m	Useful load	2,500 lbs / 1,134 kg
Cruise altitude	10,000'	MTOW	14,000 lbs / 6,350 kg
Service ceiling	12,500'	Powerplant (total)	900 / 260 kW (peak/cruise)
Range	540 NM (+45min IFR reserve)		
EXTERNAL DIMENSIONS		BATTERY	
Length	43.3' / 13.2 m	Battery	920 kWh
Wingspan	52.9' / 16.12 m	Battery chemistry	Lithium Ion (NMC)
Height	13.8' / 4.2 m	Battery weight	3,600 kg (~60% MTOW)
*Direct operating costs		\$200/hr	

Fuente: Obtenido de la página web oficial de Eviation Aircraft (2020).

También podemos destacar, uno de los últimos diseños que se han realizado: el **X-57 Maxwell** una aeronave eléctrica diseñada por la NASA, y que ha realizado su primer vuelo este año (Roca, 2020).

El diseño de esta aeronave, está basado en un Tecnam P2006T modificado para poder introducir el sistema de propulsión eléctrica ("X-57 Maxwell", 2020).

Esta versión totalmente eléctrica, es la Modification 4, en la que se realizaron pruebas de los catorce motores que incluye la aeronave.

En cuanto a las configuraciones, esta aeronave tiene un ala delgada, diseñada para aumentar la eficacia y reducir la resistencia al aire durante el vuelo. Cuenta con dos motores eléctricos con hélices en las puntas de las alas, para no perder energía potencial en los vórtices de las mismas. Además de doce

motores con hélices más pequeñas a lo largo de todo el borde de ataque. Contiene una batería de litio-ion de 69,1 kWh, de los que realmente 47kWh son utilizables. El peso de las baterías es aproximadamente 390 kg ("X-57 Maxwell", 2020).

Cuadro 4.7: Especificaciones técnicas del X-57 Maxwell.

Aircraft Weight – Approximately 3,000 pounds.	Cruise Motors and Propellers (2)
Maximum Operational Altitude – 14,000 feet.	<ul style="list-style-type: none"><li>• 60 kilowatts.</li><li>• Air-cooled.</li><li>• 5-foot diameter propeller.</li><li>• Out-runner, 14-inch diameter.</li><li>• 117 pounds each, combined weight.</li></ul>
Cruise Speed – 172 mph (at 8,000 feet)	High-Lift Motors and Propellers (12)
Critical Takeoff Speed – 58 knots (67 mph).	<ul style="list-style-type: none"><li>• 5-blade, folding propeller.</li><li>• 10.5 kilowatts.</li><li>• Air-cooled.</li><li>• 1.9 foot diameter propeller.</li><li>• 15 pounds each, combined weight.</li></ul>
Batteries	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Lithium Ion.</li><li>• 860 pounds.</li><li>• 69.1 kilowatt hours (47 kilowatt hours usable)</li></ul>	

Fuente: Obtenido de la página oficial de la agencia NASA (2020).

El funcionamiento sería el siguiente: para poder realizar el despegue, que como hemos comentado, es el momento en que se requiere mayor consumo energético. Se activarían los catorce motores de la aeronave, otorgando así la potencia necesaria para el despegue. Una vez se hubiera realizado, durante la fase de crucero se desactivan, y las palas de las hélices se pliegan para reducir la resistencia alcanzando una velocidad de 280 km/h (Roca, 2020).

De esta manera se elimina la mayoría de las emisiones de dióxido de carbono y reduce de manera notable la contaminación sonora. Adicionalmente, según indican en la revista Muy Interesante, en comparación con aeronaves del mismo tamaño, reduce un 40% los costes operativos (Jódar, 2020).

Figura 4.21: Imagen de la aeronave X-57 Maxwell.



Fuente: Obtenida de la página web El Periódico de la Energía (2020).

#### 4.3.2. Propulsión Híbrida

Como se ha comentado anteriormente, este tipo de motores tendrían un funcionamiento similar a los motores de automóviles, combinando el consumo de combustible convencional o incluso biocombustibles, con energía eléctrica. De esta manera para poder realizar el despegue y aterrizaje, se usaría el combustible, y durante el resto de fases se utilizaría la propulsión eléctrica (Planelles de Pablo, 2017).

El principal problema de las aeronaves híbridas, es el mismo que presenta la propulsión eléctrica: las **baterías y la densidad energética**. Para poder proporcionar la energía necesaria para impulsar una aeronave comercial, con un tamaño convencional, es imprescindible que tenga un diseño, que hoy por hoy, es demasiado grande y pesado, y conllevaría a la renuncia de una gran parte de la carga de pago (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

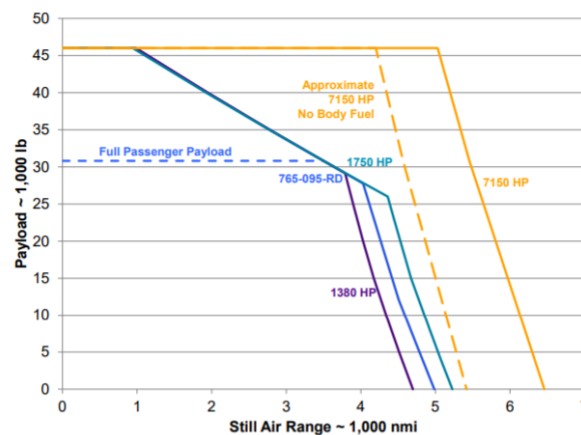
No obstante este problema se vería en parte reducido, al introducir el combustible que mediante una turbina de gas, alimentaría a las baterías con un generador cargándolas. Unas baterías que, en este caso serían de menor tamaño y peso (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

El funcionamiento teórico sería el siguiente: durante las fases de vuelo de alto consumo energético, como el despegue y ascenso, los motores consumen la energía de las baterías. Esa energía durante las fases de menor consumo energético (crucero) se recuperaría (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

La principal ventaja de la propulsión híbrida es que, respecto a la propulsión eléctrica amplía el rango posible en el diagrama de carga de pago/alcance. (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Siguiendo el estudio sobre aeronaves híbridas subsónicas (SUGAR) elaborado por la NASA en 2015, donde presentaron tres diseños de aeronaves híbridas con turbinas de gas y baterías para la propulsión eléctrica. El diagrama de pago/alcance teórico de esas aeronaves, podría verse representado en la Figura 4.22, donde se muestran diferentes modelos de aeronaves y combinaciones de potencia medidos en caballos de potencia (HP) del sistema eléctrico, mediante las cuales, varía la capacidad de carga o la distancia máxima de alcance (Bradley & Droney, 2015).

Figura 4.22: Gráfico de carga de pago/alcance para aeronaves eléctricas.



Fuente: Obtenida del informe elaborado por Bradley y Droney (2015).

Actualmente, existen numerosos prototipos de aeronaves híbridas. Combinando además diferentes medios de propulsión como por ejemplo, combustible convencional y electricidad, biocombustible y electricidad, hidrógeno y electricidad... Por otro lado, debido a la complejidad que plantea el propio diseño y desarrollo tecnológico de la aeronave híbrida, generan que su implantación sea prevista a más largo plazo (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Algunos de esos prototipos realizados por los grandes fabricantes de aeronaves comerciales a día de hoy, son:

El **SUGAR Volt**, (Subsonic UltraGreen Aircraft Research), una aeronave subsónica, diseñada como parte del programa SUGAR, una colaboración entre la empresa BOEING y la NASA ("Boeing: 2014 Environment Report", 2014).

Con un diseño convencional basado en el Boeing 737-800, tendría dos turbinas de gas que serían alimentadas de combustible fósil, para aquellas fases de vuelo donde es necesario emplear más energía o empuje para mover la aeronave. Mientras que en aquellos momentos donde la demanda energética es menor, la propulsión se realiza usando energía térmico-eléctrica, llegando incluso a realizar cero emisiones. Esta combinación supondría el ahorro de aproximadamente el 70% de combustible en comparación con las aeronaves de características similares de 2012 ("Sugar Volt: Envisioning Tomorrow's Aircraft", 2020)

Uno de los principales problemas que presenta este diseño, es la gran envergadura de la aeronave. Puesto que supone el doble de las aeronaves actuales, lo que implica que tuviera que tener alas plegables, para poder utilizar las instalaciones existentes (Artés, 2012).

Según indicaba para el Smithsonian Magazine en 2012, Marty Bradley, técnico asociado del Departamento de investigación y tecnología de la empresa Boeing, consideraban que esta tecnología estaría disponible para aproximadamente 2030-2050 ("Sugar Volt: Envisioning Tomorrow's Aircraft", 2020).

Figura 4.23: Aeronave SUGAR Volt de BOEING.



Fuente: Obtenida de la página web oficial de Boeing (2020).

En cuanto a las características técnicas del SUGAR Volt, se muestran en la siguiente Figura 4.24. Como se ha indicado anteriormente, estas especificaciones teóricas, variarían en función de la combinación de potencia del sistema eléctrico incorporado en la aeronave. Por otro lado, el funcionamiento teórico de la turbina FAN del SUGAR Volt, se muestra en la Figura 4.25.

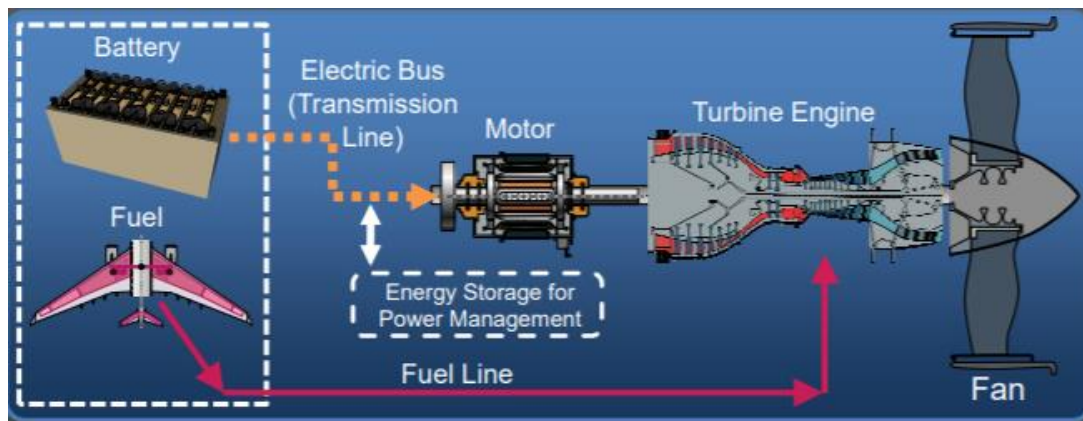
Figura 4.24: Características técnicas del SUGAR Volt.

Table 2.7 ~ 765-096-RA Group Weight Statement

GROUP	WEIGHT (LB)		
	1,380 HP	1,750 HP	7,150 HP
WING	16,986	17,011	18,808
TAIL	3,157	3,157	3,157
FUSELAGE	16,929	16,928	17,307
WING STRUT & MLG SUPT INSTL	5,077	5,077	6,584
LANDING GEAR	5,073	5,116	6,264
NACELLE & PYLON	3,682	3,682	3,682
PROPULSION	11,028	11,314	16,429
ENGINES	9,300	9,586	14,698
FUEL SYSTEM	1,728	1,728	1,731
FLIGHT CONTROLS	2,652	2,652	2,652
POWER SYSTEMS	4,068	4,068	4,068
AUXILIARY POWER UNIT	1,014	1,014	1,014
HYDRAULICS	758	758	758
ELECTRICAL	2,297	2,297	2,297
INSTRUMENTS	773	773	773
AVIONICS & AUTOPILOT	1,504	1,504	1,504
FURNISHINGS & EQUIPMENT	9,115	9,115	9,115
AIR CONDITIONING	1,441	1,441	1,441
ANTI-ICING	121	121	121
MANUFACTURER'S EMPTY WEIGHT (MEW)	81,607	81,960	91,907
OPERATIONAL ITEMS	7,207	7,207	7,207
OPERATIONAL EMPTY WEIGHT (OEW)	88,814	89,167	99,114
USABLE FUEL	14,716	13,298	12,178
MAX BATTERY POD	15,670	16,735	47,908
DESIGN PAYLOAD	30,800	30,800	30,800
TAKEOFF GROSS WEIGHT (TOGW)	150,000	150,000	190,000

Fuente: Obtenida del informe elaborado por Bradley y Droney (2015).

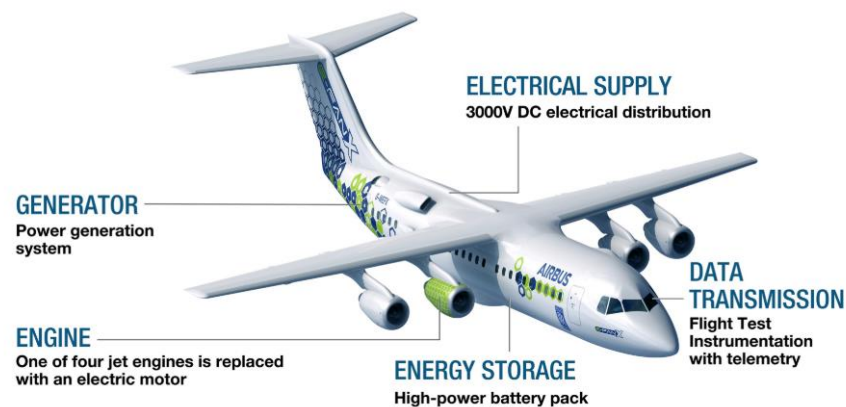
Figura 4.25: Funcionamiento teórico de la turbina FAN del SUGAR Volt.



Fuente: Obtenida de la página oficial de la agencia NASA.

Otro prototipo destacable sería la aeronave **E-Fan X** del fabricante AIRBUS. Este diseño de 2017, evolucionado del E-Fan, y basado en un AVRO RJ100, mantendría tres motores de combustible y otro motor eléctrico de 2 MW.

Figura 4.26: Prototipo E-Fan X.



Fuente: Obtenida de la página web oficial de Airbus (2020).

Sin embargo, durante la realización de este trabajo en abril de 2020 y según indican, como consecuencia del COVID-19, la directora de Tecnología en Airbus, Grazi Vittadini, comunicó que este proyecto había sido cancelado de mutuo acuerdo entre Airbus y Rolls-Royce, tras la retirada de Siemens. Aunque tenían la intención de realizar su primer vuelo en 2021 ("Our decarbonisation journey continues: looking beyond E-Fan X", 2020).



#### 4.3.3. Biocombustibles y combustibles sostenibles

Como hemos indicado anteriormente, los biocombustibles son la gran apuesta a día de hoy, como principal alternativa del queroseno convencional sobre todo, a corto plazo. Teniendo en cierta medida, capacidad para sustituirlo (Rofa Barragán, 2016).

Para impulsar la utilización de los mismos, en el año 2015, IATA esperaba que los biocombustibles ocuparan el 1% del total de combustible empleado en la aviación comercial, aumentando esa cifra hasta el 15%, para el año 2020 ("News 03 Biocombustibles para volar más limpio", 2012). Tanto es así, que durante el año 2015 al menos 2.000 vuelos comerciales de más de 20 aerolíneas diferentes, fueron realizados utilizando biocombustibles y otras fuentes renovables (Aviation Climate Solutions, 2015).

A día de hoy, y según indica la OACI, se han producido más de 200.000 vuelos comerciales realizados con mezcla de combustibles alternativos ("Fast Facts. ICAO Global Framework for Aviation Alternative Fuels", 2020).

Como su propio nombre indica, los biocombustibles son aquellos combustibles utilizados para los motores de combustión interna, obtenidos a través de procesos biológicos mediante materia orgánica, normalmente vegetal. Reduciendo así, hasta el 85% de las emisiones contaminantes ("Biocombustibles para la aviación, ASTM D6866 análisis", 2020).

Las principales ventajas de los biocombustibles, son como indican Benito y Benito, (2012) las siguientes:

- En primer lugar, existe una **seguridad en el suministro**, puesto que al tratarse de una fuente de energía renovable, mientras existan superficies suficientes disponibles para el cultivo, se puede seguir produciendo.
- Otra gran ventaja es que, a primera vista, el bioqueroseno presenta **neutralidad** en la generación de CO<sub>2</sub>. Pues las emisiones producidas mediante la extracción, tratamiento y refino, logística o transporte y combustión son compensadas gracias a la absorción de CO<sub>2</sub> de las propias plantas empleadas, durante su crecimiento mediante la fotosíntesis.
- Adicionalmente, cabe destacar algunas **propiedades** que presentan los biocombustibles como un buen punto de fluidez, punto de nubosidad y resistencia térmica que los hacen potencialmente competitivos (Unlu & Durmaz Hilmioglu, 2018).



Pero la principal ventaja que presentan los biocombustibles, que los diferencia de las líneas de investigación presentadas hasta ahora, es su capacidad de utilización sin necesidad de realizar cambios en los motores ni en el sistema de combustible actual de las aeronaves (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Sin embargo, para poder utilizar los biocombustibles de esta manera denominada “**Drop-In**”, deben respetar los límites de la especificación del JET-A1. Es decir, tiene que mantener propiedades similares a los combustibles convencionales (Benito y Benito, 2012) mencionadas anteriormente en el Cuadro 4.3.

Es por esto, que no fue hasta el año 2008, cuando se empezaron a realizar las primeras pruebas con biocombustibles en vuelos reales (Benito y Benito, 2012).

Aunque lo desarrollaremos de manera más específica en el Apartado 4.6, podemos adelantar que en el año 2011, fueron modificados los estándares de utilización de combustible en aviación comercial, para permitir el uso de mezclas hasta con un 50% de biocombustibles. Estas modificaciones fueron recogidas en el método estándar **ASTM D7566**.

De esta manera, en el año 2011, únicamente había certificados dos tipos de biofuel, ascendiendo hasta seis a día de hoy.

Normalmente los biocombustibles utilizados en la aviación se clasifican en generaciones, según la materia prima y la tecnología utilizada para su obtención. De esta manera encontramos los siguientes:

### **Primera generación**

Esta primera generación, se obtenía bioetanol a raíz de la fermentación de especies previamente cultivadas para otros fines, principalmente alimenticias, con altos contenidos de almidón, azúcar y aceite. Como por ejemplo la caña de azúcar, maíz, soja, colza y varios tipos de palmeras (Benito y Benito, 2012). Este hecho generó que fuera objeto de fuertes críticas (Jiménez Crisóstomo et al. 2019). Sobre todo hacia el bioetanol obtenido a partir del maíz, puesto que además su producción generaba más contaminación medioambiental que la de los combustibles convencionales (Nelson, 2017).

## **Segunda generación**

Esta segunda generación, se hizo a raíz de productos lignocelulósicos y aceites vegetales, evitando así la utilización de productos alimenticios (Jiménez Crisóstomo et al. 2019). Estos productos son por ejemplo, residuos agrícolas o forestales con altos contenidos de celulosa. Así como algas, madera, camelina, plantas halófilas, jatropha, levadura y eucalipto (Planelles de Pablo, 2017).

De esta generación podemos destacar la **camelina**, un tallo floral que puede alcanzar varios pies de altura y se puede cultivar en campos de trigo en barbecho. El combustible se obtiene del aceite que se extrae de la planta ("Biocombustibles para la aviación, ASTM D6866 análisis", 2020).

Por otro lado, también es relevante la **jatropha**, un arbusto venenoso que puede cultivarse en tierras no aptas para cultivos alimenticios. También puede cultivarse en aguas contaminadas, reduciendo en parte, el problema de búsqueda de la extensión necesaria para su cultivo a gran escala ("Biocombustibles para la aviación, ASTM D6866 análisis", 2020).

Uno de los principales problemas que presentan estos cultivos, es la posibilidad que muestran para desplazar cultivos alimentarios (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

En cuanto a las ventajas o avances que presentan frente a los biocombustibles de la primera generación, estas son:

- Requieren menos agua, terrenos y productos químicos (Planelles de Pablo, 2017). Concretamente, la camelina y la jatropha pueden cultivarse en zonas tropicales, donde haya calor y humedad, sin necesidad de necesitar un terreno con muchos nutrientes (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).
- No presentan competencia con la industria alimentaria.
- Son más eficaces y producen más energía que los biocombustibles de primera generación.

Sin embargo, también cabe destacar que según indican Benito y Benito, (2012) la extensión de cultivo necesaria para garantizar el suministro de queroseno, sería cuatro veces la equivalente a la superficie de España (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

### **Tercera generación**

Esta tercera generación se obtiene principalmente a partir de cultivos hidropónicos como algas unicelulares y halófitos. En diferencia con las especies utilizadas anteriormente, tienen un crecimiento rápido y una alta densidad energética, ya que generan una gran cantidad de grasas. Por otro lado también podemos destacar algunos pastos perennes y plantas de crecimiento rápido (Planelles de Pablo, 2017).

Estas especies de algas viven tanto en agua dulce, como en agua salada. E incluso en aguas contaminadas, como por ejemplo las aguas residuales que contienen altos niveles de carbono. Otro avance que presenta esta generación de cultivos, es que pueden producirse en instalaciones de círculo cerrado, con la ventaja de que tanto el dióxido de carbono como las aguas residuales se utilizan como nutrientes (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Si bien se había planteado anteriormente el uso de algas, su desarrollo en esta generación se basa principalmente en la capacidad que generan para producir un mayor rendimiento usando una menor cantidad de materia prima. Puesto que además, crecen muy deprisa, consumen CO<sub>2</sub> y generan una alta cantidad de lípidos. Así como la facilidad que plantea el transformar el aceite derivado en etanol, gasolina y diésel puro (Planelles de Pablo, 2017).

Tanto es así, que se plantea que con una superficie aproximada de 58.000 km<sup>2</sup> de cultivos, más o menos la superficie ocupada por Irlanda, se podrían abastecer las necesidades energéticas del sector en la actualidad (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

### **Cuarta generación**

Actualmente, se están desarrollando una generación de biocombustibles, a raíz de bacterias modificadas genéticamente (Planelles de Pablo, 2017).

#### **4.3.3.1. Tipos de biocombustible**

Existen diversos tipos de biocombustibles, dependiendo de su procedencia. Aquellos con los que se está investigando para su utilización en las aeronaves son principalmente los procedentes del etanol, BTL (Bio To Liquid), biomasa y aceites vegetales (Benito y Benito, 2012).

Sin embargo, desde el año 2012, también se han desarrollado biocombustibles derivados de otros productos como las algas, microalgas o incluso los mencionados anteriormente PowerToLiquid.

Unlu & Durmaz Hilmioglu (2018) los clasifica en los siguientes tipos:

- **Derivados de materiales naturales:** como pueden ser el azúcar, almidón, aceites, materiales con celulosa, y residuos orgánicos. De estos materiales se obtiene biofuel y bioetanol. Sin embargo, debido a la inestabilidad que presenta el bioetanol o su baja densidad energética, no se está investigando su desarrollo para la aviación.
- **Combustibles renovables hidroprocesados:** estos combustibles son muy similares a los obtenidos mediante el método Fischer-Tropsch. Son combustibles líquidos paraafínicos. Proceden de la hidrodesoxigenación de algas, grasa residual, aceites animal o vegetal, y el aceite derivado de semillas de plantas como la jatropha y la camelina. Una de las principales ventajas de estos combustibles es que se pueden utilizar directamente, sin requerir tampoco ninguna modificación en los motores de las aeronaves actuales.
- **Combustibles Fischer-Tropsch:** los combustibles obtenidos mediante este método, son hidrocarburos, puesto que se generan a partir de gas de síntesis. Este procedimiento se realiza bajo condiciones de alta temperatura y presión. Además, el proceso se acelera mediante catalizadores de hierro o cobalto. Existe una gran variedad de materiales a partir de los cuales se puede obtener combustible usando este proceso. Como por ejemplo residuos de agricultura, o las plantas enteras de camelina y jatropha. Sin embargo este proceso es costoso y si bien es válido, tiene una baja eficiencia energética.
- **Biodiesel:** que según indican Unlu & Durmaz Hilmioglu (2018), su uso no es recomendable para aviación.
- **Biohidrógeno y Biometano:** estos se producen mediante la fermentación bacteriológica. Si bien el hidrógeno líquido puede usarse como combustible de aeronaves, como hemos visto anteriormente. Su uso requiere la modificación o adaptación de la arquitectura de los motores actuales, además necesita un alto volumen de almacenaje.  
Por otro lado, el biometano se puede utilizar como combustible de aviones criogénicos, es decir aquellas aeronaves que utilicen contenedores criogénicos para almacenar el combustible. Pero igualmente requiere modificaciones en los motores actuales para poder utilizar biometano líquido.
- **Bioalcoholes**

En el siguiente Cuadro 4.8, se muestra en base a las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles fósiles usados en aviación, las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada biocombustible en función de la materia prima y el método de producción utilizados.

Cuadro 4.8: Ahorro de emisiones de cada biocombustible en comparación con el JET-A1.

Conversion technology	Fuel feedstock	% direct emissions savings compared to fossil-based aviation fuel baseline of 89 gCO <sub>2</sub> eq/MJ
Fischer-Tropsch (FT)	Agricultural residues	89-94%*
	Forestry residues	88%
	Municipal Solid Waste (MSW)	68%
	Short-rotation woody crops	81%
	Herbaceous energy crops	87%
Hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA)	Tallow	78%
	Used cooking oil	85%
	Palm fatty acid distillate	76%
	Soybean	53%
	Rapeseed/Canola	48%
	Camelina	54%
	Palm oil - closed pond	61%
	Palm oil - open pond	29%
Synthesized iso-paraffins (SIP)	Sugarcane	62%
	Sugarbeet	68%
Alcohol (iso-butanol) to jet (ATJ)	Agricultural residues	71%
	Forestry residues	74%
	Sugarcane	69%
	Corn grain	54%
	Herbaceous energy crops (switchgrass)	66%
	Molasses	69%
Alcohol (ethanol) to jet (ATJ)	Sugarcane	69%
	Corn grain	26%

Fuente: Obtenido de la página web oficial de EASA (2020).

#### 4.3.3.2. Formas de producción

Tradicionalmente, los biocombustibles para aviación se pueden obtener de dos maneras (Benito y Benito, 2012):

- Empleando la **planta entera**, usando el método **Fischer-Tropsch**.

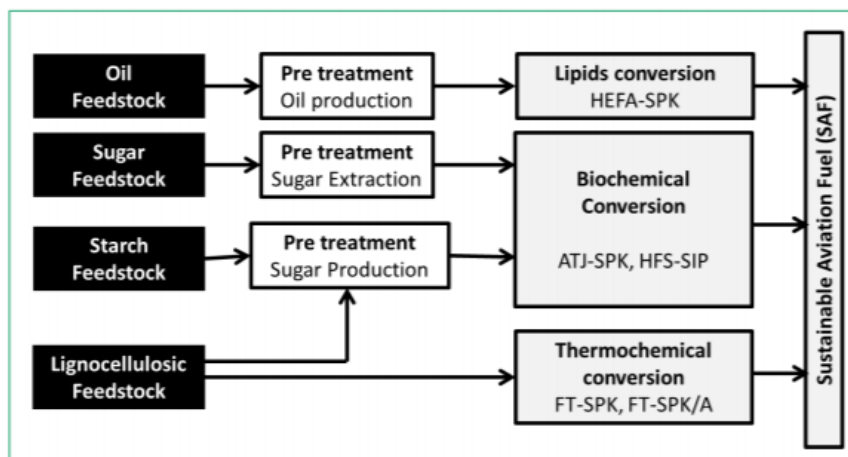
- O bien empleando únicamente las **semillas** de las plantas puesto que son ricas en aceite. Estas semillas, son hidrogenadas y se utiliza el método **Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)**.

No obstante, existen más métodos de producción de biocombustibles, en función de la materia prima de la que se obtiene (Unlu & Durmaz Hilmioglu, 2018). Sin entrar en más detalle, esos métodos son:

- Proceso termoquímico
- Hidroprocesamiento
- Proceso bioquímico
- Producción de Hidrógeno líquido y metano líquido
- Transesterificación de aceites y grasas.

A rasgos generales, en la siguiente Figura 4.27 se muestra el proceso de producción de biocombustibles o combustibles sostenibles (SAF).

Figura 4.27: Proceso de producción de combustibles sostenibles (SAF).



Fuente: Obtenida del informe Sustainable Aviation Fuels Guide 2018 (OACI).

A febrero de 2020, existen seis métodos de producción aprobados para obtener biocombustibles para aviación. Siempre y cuando se utilicen mezclándolos con combustible convencional en las proporciones indicadas y aprobadas según los estándares propuestos por la American Society for Testing and Materials (**ASTM**). No obstante, existen más propuestas de biocombustibles que actualmente están siendo valoradas por la ASTM ("Bio-based aviation fuels | European Aviation Environmental Report", 2020). Esos métodos aprobados se muestran en el siguiente Cuadro 4.9:

Cuadro 4.9: Formas de producción de biocombustibles aprobadas para aviación.

Pathways for sustainable aviation fuel production			
Approved following careful review by experts coordinated by ASTM			
Pathways and processes	Feedstock options	Date of approval	Current blend
<b>FT-SPK</b>	biomass (forestry residues, grasses, municipal solid waste)	2009	up to 50%
<b>HEFA-SPK</b>	algae, jatropha, camelina	2011	up to 50%
<b>HFS-SIP</b>	microbial conversion of sugars to hydrocarbon	2014	up to 10%
<b>FT-SPK/A</b>	renewable biomass such as municipal solid waste, agricultural wastes and forestry residues, wood and energy crops	2015	up to 50%
<b>ATJ-SPK</b> [isobutanol]	agricultural waste products (stover, grasses, forestry slash, crop straws)	2016	up to 50%
<b>ATJ-SPK</b> [ethanol]	agricultural waste products (stover, grasses, forestry slash, crop straws)	2018	up to 50%
<b>CHJ</b>	triglyceride-based feedstocks (waste oils, algae, soybean, jatropha, camelina, carinata, tung)	2020	up to 50%
For further information, see <a href="http://www.enviro.aero/SAF">www.enviro.aero/SAF</a>			

Fuente: Obtenida de la página web Aviation Benefits Beyond Borders (2020).

En cuanto a esos métodos de producción podemos añadir lo siguiente ("Bio-based aviation fuels | European Aviation Environmental Report", 2020):

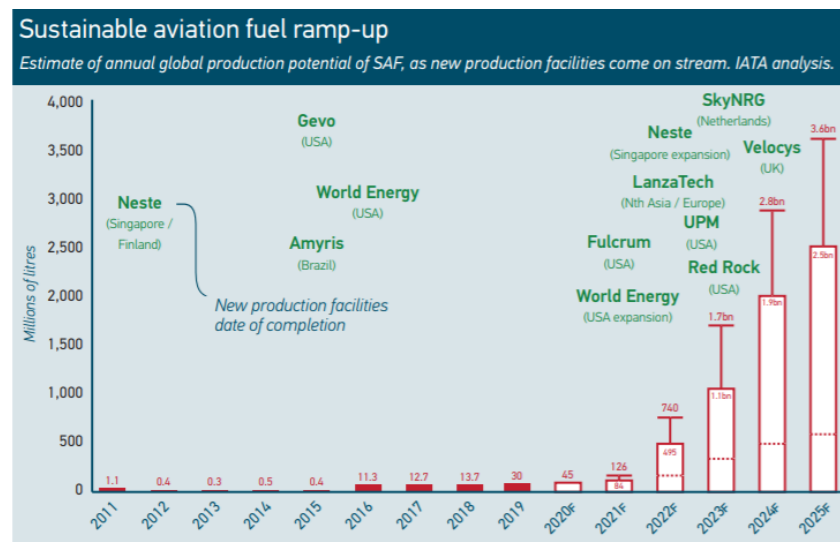
- **FT-SPK:** se realiza mediante la conversión de biomasa, convirtiéndola en gas sintético compuesto por hidrógeno y monóxido de carbono, y posteriormente se transforma en combustible.
- **HEFA-SPK:** la materia prima se convierte en diésel, usando hidrógeno. De ese diésel se puede obtener combustible para aviación.
- **HFS-SIP:** mediante levaduras modificadas, los azúcares se convierten en una molécula hidrocarbonada que puede mezclarse con combustible para reactores.
- **FT-SPK/A:** es una variación del FT-SPK. La alquilación de compuestos aromáticos crea hidrocarburos que incluyen estos compuestos.
- **ATJ-SPK:** la deshidratación, oligomerización y el hidroprocesado, generan que los alcoholes se conviertan en hidrocarburos.

A día de hoy, la producción de biocombustibles tan solo abarca el 0,01% del total de combustible usado para aviación a nivel mundial ("Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #5", 2020).

En la siguiente Figura 4.28, se muestra la estimación de producción mundial de biocombustibles o combustibles sostenibles para dentro de 5 años, realizada en 2020 por ATAG. En las horquillas que se muestran representando la posibilidad de litros que se podrían producir, han valorado variables como por ejemplo las facilidades de los productores o las decisiones de las aerolíneas sobre el consumo de biocombustibles ("Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #5", 2020).

Mediante estas estimaciones, consideran que, manteniendo las condiciones evaluadas, la producción de biocombustibles podría abarcar el 2% del suministro total de combustible para aviación. Lo que supondría aproximadamente 7 mil millones de litros ("Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #5", 2020).

Figura 4.28: Producción estimada de combustibles sostenibles.



Fuente: Obtenida de la página web Aviation Benefits Beyond Borders (2020).

#### 4.3.3.3. Logística y abastecimiento

La viabilidad de la producción de biocombustibles, depende directamente de la disponibilidad de la materia prima, que a su vez deriva de la infraestructura de suministro existente ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2018). Y este es sin duda, uno de los principales problemas que presentan los biocombustibles.

Tanto es así, que en el año 2011 tras cinco meses de pruebas con biocombustibles en la aerolínea Lufthansa, uno de los principales motivos por los que tuvo que abandonarlo, fue la dificultad de aprovisionamiento (Benito y Benito, 2012).



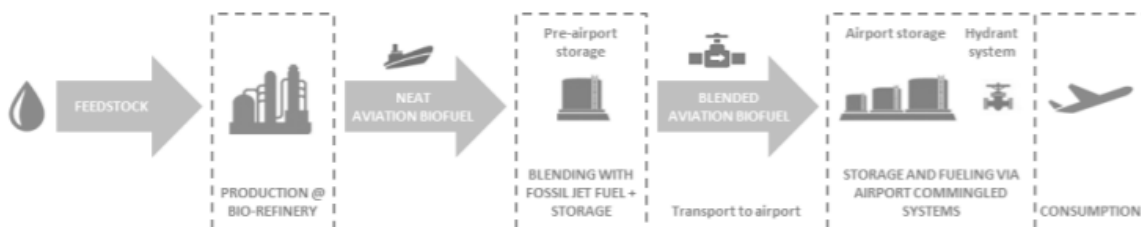
Por ello, uno de los principales retos a abarcar en el ámbito de los biocombustibles, es la **gestión logística** de los mismos (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).

Esta gestión, varía notablemente en función de las condiciones de cada país. Por ello, la distribución de los biocombustibles requiere un estudio estratégico que como indican la AERPL e IICA, debe incluir la motivación de cada país, la situación geográfica de las zonas de cultivo, el tipo de cultivo, la distribución de la demanda... (Ganduglia et. all, 2009).

No obstante, existen compañías encargadas del suministro de biocombustibles a diferentes aeropuertos como por ejemplo: **Neste Oil** (Europa), **Fulcrum** (EE.UU), **AltAir Fuels** (EE.UU) y otras propuestas de comercialización mostradas en la Figura 4.30.

Si bien la presencia de estas compañías en los aeropuertos, depende principalmente de los contratos y compromisos que tengan con las aerolíneas. La disposición de las infraestructuras aeroportuarias para la distribución de combustibles sostenibles, pueden ser o no, un impedimento para su implantación (Ganduglia, et. all 2009). Generando una especie de círculo por el que, mientras no se generan contratos corporativos (B2B), propulsados mediante una política y regulación favorable, y una serie de incentivos para promover el consumo de biocombustibles en las aerolíneas, no se generará la demanda suficiente para la implantación de infraestructuras económicamente asequibles en los aeropuertos y así a su vez, promocionar el uso de los mismos (Ditcher et al., 2020).

Por lo general, estas compañías de abastecimiento funcionan de la forma mostrada en la Figura 4.29:



Fuente: Obtenida de la página web oficial de SENASA (2020).

Tras la producción del biocombustible, este es transportado hasta un proveedor de biocombustibles que lo almacena en la terminal del aeropuerto en el que ha sido solicitado. En esos tanques de almacenaje, se genera la mezcla de biocombustibles con el combustible convencional, y se comprueban sus

características técnicas para su posterior certificación. Posteriormente se vende y distribuye al aeropuerto en camiones cisterna donde se almacena, y finalmente se suministra a las aerolíneas en función de sus demandas (SkyNRG, 2016).

#### 4.3.3.4. Biocombustibles Certificados. Ejemplos y Precio.

En cuanto a ejemplos de biocombustibles, podemos destacar las siguientes empresas que se dedican a la comercialización de los mismos.

Figura 4.30: Ejemplos de biocombustibles y propuestas de comercialización.

Conversion Process	Abbreviation	Possible Feedstocks	Blending ratio by Volume	Commercialization Proposals
Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene	FT-SPK	Coal, natural gas, biomass	50%	Fulcrum Bioenergy, Red Rock Biofuels, SG Preston, Kaidi, Sasol, Shell, Syntroleum
Synthesized paraffinic kerosene produced from hydroprocessed esters and fatty acids	HEFA-SPK	Vegetable oils and fats, animal fat, recycled oils	50%	AltAir Fuels, Honeywell UOP, Neste Oil, Dynamic Fuels, EERC
Synthesized iso-paraffins produced from hydroprocessed fermented sugars	HFS-SIP	Biomass used for sugar production	10%	Amyris, Total
Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources	FT-SPK/A	Coal, natural gas, biomass	50%	Sasol
Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene	ATJ-SPK	Biomass used for starch and sugar production and cellulosic biomass for isobutanol production	30%	Gevo, Cobalt, Honeywell UOP, LanzaTech, Swedish Biofuels, Byogy

Fuente: Obtenida del informe Sustainable Aviation Fuels Guide 2018 (OACI).

Para finalizar este apartado, se ha considerado importante realizar una pequeña mención a los precios del biocombustible, puesto que esta es una de las principales barreras por las que no existen más aerolíneas dispuestas a utilizarlos ("Bio-based aviation fuels | European Aviation Environmental Report", 2020).

Estos precios actualmente elevados de la materia prima utilizada, presentan problemas para los principales productores de biocombustibles, que en cierta medida ven sus ingresos supeditados a la

variación de estos precios. Por otro lado, la cercanía a las plantas de procesamiento y las infraestructuras requeridas para su transporte y almacenamiento, condicionan el precio, encareciéndolo notablemente ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2018).

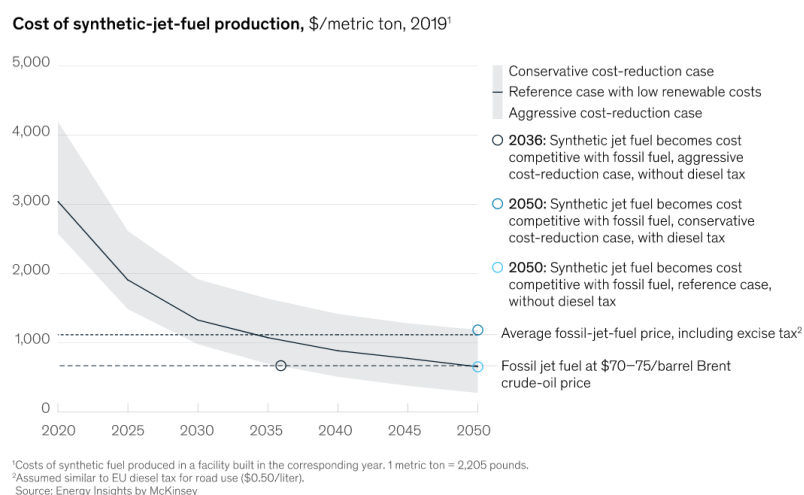
Por tanto, si bien el precio típico del queroseno para aviación procedente de combustibles fósiles, suele rondar los 600€/tonelada. El precio de combustible para aviación basado en productos biológicos, está rondando los 950 a 1.105€/tonelada ("Bio-based aviation fuels | European Aviation Environmental Report", 2020).

Sin embargo, cabe destacar que existen aerolíneas que han comenzado repercutir esos costes en los precios de los billetes, ofreciendo directamente a los pasajeros, la posibilidad de "comprar" billetes de vuelo con un ligero sobrecargo sabiendo que se corresponde al uso de biocombustibles. Esas aerolíneas son por ejemplo Lufthansa, Swiss, SAS o Finnair ("The leading edge", 2020).

Finalmente, según indica el DOE los esfuerzos en I+D+i y su producción en escala, podrán reducir los precios de los biocombustibles aproximadamente un 75%, mediante el aumento del rendimiento de la materia prima y la reducción de los costes de producción ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2018).

Gracias a esas investigaciones y economías de escala, según indica el análisis realizado por McKinsey & Company (2020), los biocombustibles podrían ser económicamente competitivos entre 2030 y 2035, en un escenario optimista.

Figura 4.31: coste de producción del combustible sintético para aviones.



Fuente: Obtenida de la página web McKinsey & Company (2020).

#### **4.4. PEQUEÑO ANÁLISIS COMPARATIVO. VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

Al margen de las características y propiedades mencionadas a lo largo de la realización de este trabajo, si bien cada modelo de propulsión tiene claro potencial de manera individual. Se considera que, adicionalmente podrían combinarse. Por otro lado, cabe destacar que prácticamente todas las desventajas que presentan los tres tipos de propulsión, podrían solventarse con inversión económica y tiempo de desarrollo.

##### **4.4.1. Propulsión eléctrica**

Según los datos obtenidos, las principales **ventajas** de la propulsión eléctrica serían las siguientes:

- Costes de operación por hora relativamente inferiores. Según la página oficial de la NASA, el modelo X-57 presentado anteriormente, tendría unos costes de operación por hora de 275\$ frente a los 440\$ que podría suponer cualquier aeronave de aviación general actual ("X-57 Maxwell", 2020).
- Costes de combustible por hora relativamente más bajos. Pasando, en el caso del prototipo X-57, de 200\$ a 35\$ la hora. Por ello, el porcentaje que suponen en los costes operativos por hora sería tan solo del 9%, frente al 45% que supondría el combustible en una aeronave de características similares ("X-57 Maxwell", 2020).
- No emite gases efecto invernadero.
- Elimina totalmente la dependencia energética de los combustibles fósiles.
- No hay tecnología desarrollada, lo que puede presentar una ventaja competitiva para aquellas empresas que empiecen a comercializar este tipo de motores o aeronaves ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).

Por otro lado, algunas de las **desventajas** que podríamos destacar serían:

- La densidad energética de las baterías actuales es demasiado baja para poder utilizarse en aeronaves para vuelos comerciales, y aún más bajas para que sean económicamente rentables (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).
- El tiempo de desarrollo necesario para poder comercializar aeronaves eléctricas eficientes, es actualmente demasiado largo.
- No hay tecnología desarrollada.

#### 4.4.2. Propulsión Híbrida

Las principales **ventajas** que podemos encontrar sobre la propulsión híbrida son:

- Salva en cierta medida las desventajas de la propulsión eléctrica al usar combustible (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).
- Pueden combinarse biocombustibles con propulsión eléctrica, haciendo que el modelo sea aún más ecológico.
- Capacidad de reducir la emisiones de CO<sub>2</sub> ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- No hay tecnología desarrollada, por lo que al igual que sucede con la propulsión eléctrica, presenta un nicho de mercado disponible ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).

Por otro lado, las **desventajas** actuales de la propulsión híbrida para aviación, serían:

- La principal desventaja es el tiempo de desarrollo de este tipo de motores, derivado entre otros motivos a inversión económica requerida, y al complejo diseño de los mismos (Jiménez Crisóstomo et al. 2019).
- Sigue existiendo dependencia del petróleo y los combustibles fósiles, con la fluctuación en los precios y la inestabilidad económica que ello presenta ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- No hay tecnología desarrollada ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).

#### 4.4.3. Biocombustibles

Algunas de las **ventajas** que presentan los biocombustibles frente a las líneas de investigación presentadas anteriormente son:

- Entre las principales ventajas, la más clara es la capacidad que tienen para incorporarse a las aeronaves actuales, sin necesidad de realizar grandes cambios en las mismas.
- Existe una diversificación de las fuentes de energía, por lo que encontramos múltiples formas de generar biocombustibles.
- También existe seguridad en el suministro, al tratarse de una fuente energía renovable.
- Tienen capacidad de reducir la emisiones de CO<sub>2</sub> ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- No hay tecnología desarrollada. Y como hemos comentado en anteriormente, eso supone nuevos mercados disponibles ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).

Las **desventajas** que presentan los biocombustibles se reducen a:

- Puede generar controversias sociales y medioambientales. Como por ejemplo problemas de deforestación y erosión de los suelos, o reducción de la producción de alimentos. Otro problema es, que para producir un kilogramo de combustible, es necesario el uso de 20 kilogramos de agua. (Rofa Barragán, 2016).
- Por otro lado podemos destacar la complicada gestión logística, que ha obligado incluso a prescindir de los biocombustibles por parte de alguna aerolínea ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- Altos costes de financiamiento, que acaba repercutiéndose en los precios finales del producto ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- Consistencia actual de los combustibles fósiles ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- No existe tecnología desarrollada ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).
- Precios elevados frente al jet convencional ("Bio-based aviation fuels | European Aviation Environmental Report", 2020).
- Actualmente, los biocombustibles, pueden llegar a ser de 1.5 a 3 veces más caro que el queroseno ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).

En la Tabla 4.5 se muestran las características técnicas de cada medio de propulsión mostrados en el Apartado 4.3 y el Anexo II para una aeronave de tamaño pequeño destinada a realizar vuelos de aviación regional, ejecutiva o de recreo.

En la Tabla 4.6 se muestran las características técnicas de cada medio de propulsión mostrado en el Apartado 4.3 y el Anexo II para una aeronave de gran tamaño destinada a realizar vuelos comerciales.

Tabla 4.5: Características técnicas aeronaves pequeñas.

	Autonomía	Pax	Carga de pago	Energía específica	Densidad energética
JET-A1 <sup>5</sup>	8056 Km	14	2630,8 Kg	42,8 MJ/Kg	34,7 MJ/L
Biocombustibles	8056* Km	14	2630,8* Kg	43,9 MJ/Kg	N.A.
Propulsión Eléctrica <sup>6</sup>	160 Km	2	N.A.	0,36 – 0,95 MJ/Kg	0,90 – 2.23 MJ/L
Propulsión Eléctrica - Eviation Alice	1000 Km	9	1250 Kg	0,36 – 0,95 MJ/Kg	0,90 – 2.23 MJ/L
Propulsión Híbrida <sup>7</sup>	1127 Km	12	1134 Kg	175/1160 Wh/Kg - 330/1350 Wh/Kg	N.A.

Fuente: Elaboración propia a raíz del Apartado 4.3.

Para los datos mostrados en el apartado de biocombustibles se ha tomado de referencia el vuelo del 17 de junio de 2011, realizado por un Gulfstream G450 usando biocombustible **Honeywell Green Jet Fuel™** (HEFA SPK) ("Commercial Flights. Honeywell UOP", 2020).

Sobre los modelos eléctricos, se han tomado las características típicas de una batería de ion de litio. Siendo estas:

- Densidad energética media de una batería de ion de litio es de 250 – 730 Wh/L es decir unos 0,9 – 2,23 MJ/L.
- Energía específica es de 100 – 265 Wh/Kg es decir de 0,36 – 0,95 MJ/Kg.

Sobre la energía específica proporcionada por la propulsión híbrida, se muestra un **rango eléctrico/híbrido** en base al uso de baterías de 500 kW y 900 kW respectivamente (Soldado, 2019).

<sup>5</sup> Basado en las características técnicas del Gulfstream G450.

<sup>6</sup> Basado en las características técnicas de NASA x-57 Maxwell.

<sup>7</sup> Basado en las características técnicas de ZUNUM Aero ZA10.

Tabla 4.6: Características técnicas aeronaves grandes aviones comerciales.

	Autonomía proporcionada	Pax	Carga de pago	Energía específica	Densidad energética
JET-A1	5.400 Km	189	20.540 Kg	42,8 MJ/Kg	34,7 MJ/L
Biocombustibles <sup>8</sup>	5.400* Km	189	20.540* Kg	43,9 MJ/Kg	N.A.
Propulsión Eléctrica <sup>9</sup>	539 Km	120	N.A.	0,36 – 0,95 MJ/Kg	0,90 – 2,23 MJ/L
Propulsión Híbrida <sup>10</sup>	6.482 Km	135	N.A.	750 Wh/Kg - 2,7 MJ/Kg	N.A.

Fuente: Elaboración propia a raíz del Apartado 4.3.

Para los datos sobre una aeronave propulsada mediante Jet-A1, se han utilizado las especificaciones técnicas del **Boeing 737-800** (World Aircraft, 2020).

En el apartado sobre la propulsión eléctrica, no se ha contemplado el prototipo E-Fan X de Airbus, debido a su reciente cancelación.

Sobre los biocombustibles, no se han encontrado datos específicos sobre la autonomía, carga de pago o densidad energética. Sin embargo, cabe destacar que debido al mayor poder calorífico o energía específica proporcionada por el biocombustible, genera una disminución en el flujo o consumo de combustible de la aeronave, lo que conllevaría un aumento de autonomía de la misma (Frey et al., 2017). Por otro lado, según indican en diversos estudios sobre vuelos realizados con mezclas de biocombustible, no se ha notado ninguna diferencia notable, en cuanto a la operación o en los motores de la aeronave (Kinder & Rahmes, 2009).

Finalmente para la propulsión híbrida, se muestran las características técnicas del prototipo Boeing SUGAR Volt (Soldado, 2019).

<sup>8</sup> Basado en las características del Honeywell Green Jet Fuel™ (HEFA SPK).

<sup>9</sup> Basado en el prototipo de Wright Electric y EasyJet.

<sup>10</sup> Basado en los datos obtenidos del modelo BOEING Sugar VOLT.



#### **4.5. IMPACTO EN AEROPUERTOS Y AEROLÍNEAS. EJEMPLOS**

Para analizar el impacto de los combustibles sostenibles en aeropuertos y aerolíneas, nos basaremos en algunos ejemplos de aeropuertos y aerolíneas que ya han implantado este tipo de biocombustibles.

##### **4.5.1. Aeropuertos e infraestructuras aeroportuarias**

Los primeros aeropuertos que ofrecieron biocombustibles fueron el Aeropuerto de Bergen-Flesland y el Aeropuerto de Oslo, ambos en Noruega ("Stakeholder actions | European Aviation Environmental Report", 2020). Concretamente, el Aeropuerto de Oslo, fue el primer aeropuerto internacional que en 2016, suministraba biocombustible de manera regular a todas las aerolíneas que operaban en él.

Otro hecho importante, es que además fue el primer aeropuerto en introducir los combustibles sostenibles en la granja central de combustible y distribuirlos mediante una red hidratante como la mostrada en la Figura 4.29 (CAAF/2, 2017).

Actualmente, tan solo existen **cinco aeropuertos** en todo el mundo que suministran de manera regular biocombustibles a las aerolíneas: el Aeropuerto de Los Ángeles, Aeropuerto de San Francisco, Aeropuerto de Bergen-Flesland, Aeropuerto de Oslo y el Aeropuerto de Estocolmo. Aunque existen otros aeropuertos que demandan lotes de combustibles alternativos ("Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel", 2020).

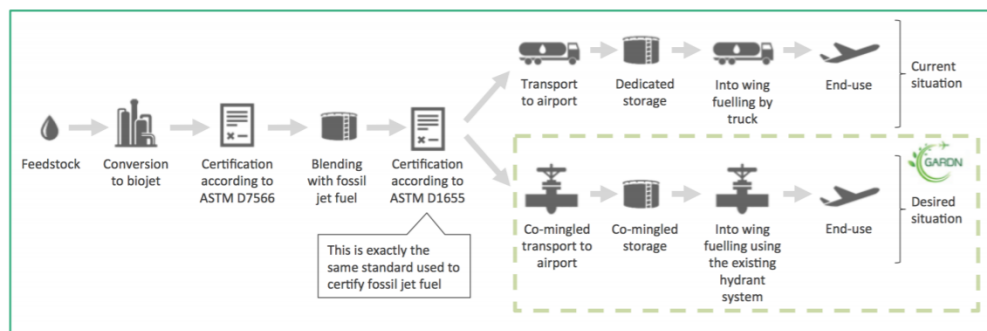
Por norma general, la forma para suministrar los combustibles sostenibles a las aerolíneas, se realiza mediante el proceso mostrado en la Figura 4.32.

Este método podría mejorarse notablemente implementando redes hidratantes de biocombustibles en las infraestructuras aeroportuarias, con la consiguiente inversión económica que ello requiere. Y de esta manera, además de promover y promocionar el uso de biocombustibles, su suministro sería más rápido y más eficiente. Y una vez amortizada la inversión en la red hidratante necesaria, más económico.

Adicionalmente, y tal y como indican en el SAFG 2018 elaborado por OACI, una forma para asegurar un mercado viable, es el desarrollo de una **infraestructura**, que además refuerce la creación de relaciones comerciales entre los productores y compradores locales.

Un ejemplo de ese impacto estructural en los aeropuertos, sería la propuesta presentada por el Canada's Biojet Supply Chain Initiative, en el Aeropuerto Internacional de Montreal – Pierre Elliott Trudeau. Mediante esta iniciativa, pretenden incorporar una red hidratante para suministrar el biocombustible, tal y como se muestra en la Figura 4.32 ("Sustainable Aviation Fuels Guide 2018", 2018).

Figura 4.32: Canada's Bioject Supply Chain Initiative.



Fuente: Obtenida del informe Sustainable Aviation Fuels Guide 2018 (OACI).

Por otro lado y finalmente, la utilización de las **aeronaves eléctricas e híbridas** requeriría la implantación en las infraestructuras aeroportuarias de tomas de recarga, o intercambio de baterías seguramente similares a las de los vehículos eléctricos. Que o bien podrían pertenecer a las aerolíneas, o bien podrían ser propiedad del aeropuerto, implementando unas tarifas por su uso, como una especie de servicio de handling. Este tipo de infraestructuras, podrían basarse en las instalaciones actuales de suministro de energía en remoto o en las pistas, que durante la carga y descarga de pasajeros, se utilizan para regular la temperatura de las aeronaves, la iluminación o la alimentación de bancos Skydrol. O basarse en las utilizadas para el mantenimiento de las aeronaves en los hangares ("Marechal Electric", 2020).

Puesto que, como indican en la página web de ZUNUM Aero, (y al igual que sucede con los biocombustibles) la clave para el uso de aeronaves eléctrico-híbridas reside en la creación de una red eficiente. Una forma para crear esa red de manera rápida y con bajos costes, es mediante el uso de aeropuertos secundarios, abordando el tráfico regional para la introducción de aeronaves híbrido-eléctricas ("ZUNUM Aero", 2020).

#### 4.5.2. Aerolíneas y operadores aéreos

Como se ha comentado en los apartados anteriores, las aerolíneas tienen un papel notable para el desarrollo de los biocombustibles. Al tratarse como consumidores últimos, su actuación y posicionamiento frente a los mismos, pueden generar la promoción de conductas proactivas sobre su implantación. Tanto es así, que muchas veces la implantación de biocombustibles en un aeropuerto concreto suele venir de la mano de acuerdos con compañías aéreas. Actualmente, existen numerosas aerolíneas que han mostrado interés en el uso de combustibles sostenibles, con el incremento en los

costes operacionales que ello genera ("Raising the Bar: NRDC'S 2017 Aviation Biofuels Scorecard", 2017).

Para calcular el impacto económico del uso de biocombustibles en las aerolíneas, a groso modo, se debería realizar una estimación del número de movimientos anuales de la compañía aérea, en función de la evolución del tráfico aéreo a nivel mundial. Ver qué cantidad de biocombustible sería necesario, y calcular el coste que supondría la adquisición de esos combustibles. Así como evaluar los costes y beneficios marginales que pudieran derivar de su consumo.

Una manera de incentivar el consumo de los biocombustibles, es mediante la evaluación positiva y el impacto social de ese consumo. Sin ir más lejos, el **Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales** desde el año 2013, elabora un ranking con aerolíneas encuestadas determinando su nivel de compromiso en cuanto a la adopción de biocombustibles de aviación. Este ranking separaba a las aerolíneas en tres grupos.

En el ranking se valoraba por ejemplo, las cantidades de biocombustible consumidas, su uso, adquisición, compromiso y desarrollo de la cadena de suministro. Así como acoger el compromiso de usar un sistema de certificación por parte de terceros, como por ejemplo la Mesa Redonda de Biomateriales Sostenibles (RSB) ("Raising the Bar: NRDC'S 2017 Aviation Biofuels Scorecard", 2017).

Figura 4.33: Ranking de aerolíneas en función de su consumo de biocombustible de 2017

TABLE 1: 2017 SCORECARD CATEGORY RESULTS		
CATEGORY	AIRLINE COMPANIES*	SCORE
Leading Airlines —strongest range of commitments and supply chain implementation. (scoring category: 20–38)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Air France/KLM Royal Dutch Airlines</li> <li>• Jet Blue</li> <li>• United Airlines</li> </ul>	23–24.5
Advancing Airlines—range of fuel purchase commitments and actions.(scoring category: 10–to under 20)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• British Airlines</li> <li>• Cathay Pacific Airways</li> <li>• GOL</li> <li>• Japan Air Lines</li> <li>• Lufthansa</li> <li>• Qantas Airways</li> <li>• SAS</li> <li>• South African Airways</li> <li>• Virgin Atlantic Airways</li> <li>• Virgin Australia Airlines</li> </ul>	10.2–19.2
Basic Airlines —basic level of fuel purchase commitments and actions.(scoring category: 1–to under 10)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Air New Zealand</li> <li>• Alaska Airlines</li> <li>• Finnair</li> <li>• Thomson Airways</li> </ul>	4.5–6
Nonresponsive Airlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AeroMexico</li> <li>• American Airlines</li> <li>• All Nippon Airways</li> <li>• Avianca Taca</li> <li>• Air Canada</li> <li>• Air China</li> <li>• Cargolux</li> <li>• Delta</li> <li>• easyJet</li> <li>• Emirates</li> <li>• Etihad Airways</li> <li>• FedEx</li> <li>• GulfAir</li> <li>• LATAM</li> <li>• Lion Air</li> <li>• Qatar Airways</li> <li>• Ryanair</li> <li>• Singapore Airlines</li> <li>• Southwest</li> <li>• Turkish Air</li> <li>• UPS</li> <li>• Westjet</li> </ul>	0

Fuente: Obtenido del informe Avition Biofuels Sustainability Scorecard 2017 (NRDC).

De este ranking podemos destacar las aerolíneas Air France/KLM Royal Dutch Airlines, Jet Blue o United Airlines. Ya que además de usar biocombustibles, se reconocen como líderes en la promoción de los mismos, debido a las grandes inversiones realizadas en compras de biocombustible o para el desarrollo del suministro de SAF ("The leading edge", 2020).

Sin embargo, de este ranking, podemos ver que de las 39 aerolíneas encuestadas, aún existe un número elevado de las mismas que no toman medidas ni consumen ningún tipo de combustibles sostenibles.

Finalmente, en cuanto a las aeronaves híbrido-eléctricas, como hemos visto a lo largo de este trabajo, actualmente no existen aeronaves eléctricas o híbridas con capacidad suficiente para usarse en aerolíneas comerciales de largo recorrido.

Sin embargo existen coaliciones y asociaciones de aerolíneas con diferentes empresas, para promover el desarrollo de este tipo de aeronaves. Como por ejemplo EasyJet y Wright Electric, o la implicación de la aerolínea Volotea en el desarrollo del prototipo híbrido, DAX-19 de la empresa Dante AeroNautical (Ramón, 2019).

Sobre el prototipo de Wright Electric y EasyJet, pretenden que esté en uso para el año 2030. Este prototipo, el **Wright 1**, está diseñado para transportar a 186 pasajeros, y tendría un sistema de propulsión eléctrico de 1,5 MW ("Wright Electric - Transforming the Aviation Industry with Electric Planes", 2020). Gracias a este sistema de propulsión, además de reducir al completo las emisiones, la aerolínea espera tener unos costes de operación un 10% inferiores a los que incurre con su flota actual (García, 2020).

El objetivo a medio plazo de EasyJet es utilizar aeronaves eléctricas para todos los vuelos de menos de 600 km de distancia. Y a largo plazo, electrificar toda su flota de aeronaves (García, 2020).

#### **4.6. LEGISLACIÓN APLICADA**

En cuanto a la legislación y normativa aplicada, bien es sabido que el transporte aéreo es uno de los medios de transporte con más normativa desarrollada, que opera bajo normas internacionales, y protocolos como las Prácticas y Estándares recomendados de la OACI (SARPs). Adicionalmente, las aerolíneas están supeditas a la normativa nacional de los Estados en los que opera. Ello hace que, estas autoridades tanto nacionales como internacionales sean un factor importante para promover la innovación en la industria a través de la investigación y desarrollo ("Sustainable Aviation Fuels Guide", 2017).

De esta manera existen diversas normas de diferentes rangos, emanadas por organismos tanto públicos como privados, que afectan al transporte aéreo en lo que al ámbito medioambiental se refiere, y el desarrollo de medios de propulsión alternativos.

Por un lado, los principales Acuerdos Internacionales que afectan al sector, en materia medioambiental son los siguientes:

##### **4.6.1. Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992 (CMNUCC)**

Este Convenio firmado durante la Cumbre de Río de Janeiro en 1992 ha sido ratificado por 195 estados. Mediante esta Convención, se reconoce el problema del cambio climático y se tratan de definir acciones y coordinar esfuerzos para estabilizar la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera, con el fin de impedir las interferencias antropogénicas peligrosas ("La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)", 2020).

Indicaba que, si se mantenían los modelos de explotación descontrolados de recursos en los países en vías de desarrollo, similar al de los países desarrollados, las emisiones de GEI crecerían de manera exponencial. Por ello, propusieron que los países desarrollados subvencionasen el desarrollo sostenible de los países emergentes, mediante el uso de energías renovables y sostenibles (Planelles de Pablo, 2017).

Su órgano ejecutivo es la **Conferencia de las Partes** (COP) compuesta por los países que ratificaron el Convenio. Estas se reúnen de manera anual para discutir y aprobar las decisiones de alcance internacional elaboradas a raíz de la Convención (Planelles de Pablo, 2017).

La última Conferencia de las Partes, la denominada COP25 fue celebrada el pasado mes de diciembre en Madrid. Donde se celebró también la 15ª reunión de las partes del Protocolo de Kioto y la 2ª del Acuerdo de París.

#### 4.6.2. **Protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático, 1997**

El **Protocolo de Kioto** es un protocolo de la CMNUCC que tiene por objetivo reducir las emisiones efecto invernadero que causan el calentamiento global. Su origen se da en la tercera reunión de la Conferencia de las Partes (COP3) del CMNUCC en 1997 en Tokio. Aunque fue adoptado en 1997, no entró en vigor hasta febrero de 2005 (Planelles de Pablo, 2017).

La importancia de este protocolo reside en que, fue la primera vez que se establecieron objetivos de reducción de emisiones netas de gases efecto invernadero, para los principales países desarrollados y economías en transición, con un calendario de cumplimiento ("Protocolo de Kioto", 2020).

Este calendario se divide en dos periodos. Un primer periodo comprendido entre 2008 y 2012, y otro periodo comprendido entre 2013 y 2020.

En el primer periodo conocido como Primer Periodo de Compromiso del Protocolo de Kioto, se acordó reducir las emisiones de gases efecto invernadero de los países industrializados al menos un 5% por debajo de los niveles de 1990 ("Protocolo de Kioto", 2020).

En 2009, de los 187 estados que ratificaron el protocolo, tan solo vinculó a 37 estados, de los que 28 pertenecían a la Unión Europea, quedándose fuera China, al no pertenecer al grupo de los países desarrollados. Adicionalmente en 2001 Estados Unidos, el mayor emisor de gases efecto invernadero a nivel mundial en ese momento, se retiró del Protocolo (Planelles de Pablo, 2017).

Por otro lado, la Unión Europea firmó un objetivo conjunto para la reducción de las emisiones un 8% respecto a niveles de 1990 para el mismo periodo (Planelles de Pablo, 2017).

Respecto al segundo periodo del Protocolo de Kioto, participaron 38 países desarrollados. En este periodo la UE, otros países europeos y Australia acordaron realizar reducciones de sus emisiones. Los principales cambios en comparación con el primer periodo son: la introducción de nuevas normas sobre la forma de contabilizar las emisiones procedentes del uso de la tierra y la silvicultura. Y la incorporación del trifluoruro de nitrógeno como gas efecto invernadero.

Cabe destacar que las emisiones de gases efecto invernadero procedente de la aviación civil internacional quedan excluidas de este Protocolo, sin embargo aquellas procedentes de vuelos domésticos dentro de un mismo país no lo están (Planelles de Pablo, 2017).

#### 4.6.3. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2015. Acuerdo de París

En diciembre de 2015 se celebró en París la 21ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático o la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) mediante la cual se consiguió alcanzar el **Acuerdo de París**. Fue firmado por los 195 países miembros de la CMNUCC, siendo el primer acuerdo vinculante mundial sobre el clima ("Acuerdo de París - Acción por el Clima - European Commission", 2020).

Mediante esta conferencia, se plantean medidas de carácter financiero, energético, geopolítico y social, con el objetivo de reducir el impacto de las actividades humanas sobre el planeta, a fin de disminuir la rapidez con la que avanza el fenómeno del calentamiento global (Planells de Pablo, 2017).

El Acuerdo de París tiende un puente entre las políticas actuales y la neutralidad climática que debe existir a finales del siglo. Por ello establece como objetivo global disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y unificar esfuerzos para mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C sobre los niveles preindustriales, e incluso limitar el aumento a 1,5°C. Este acuerdo ha entrado en vigor este 2020.

Por otro lado, durante esta Conferencia se realizó una **"Decisión"**, un documento anexo al Acuerdo en el que se establecen los trabajos que los países debían realizar antes de que entrara en vigor el Acuerdo de París. Este documento podía recibir modificaciones.

A nivel mundial, también debemos destacar una serie de regulaciones y actuaciones elaboradas por OACI, como por ejemplo:

#### 4.6.4. Comité sobre la Protección del Medio Ambiente y la Aviación (CAEP)

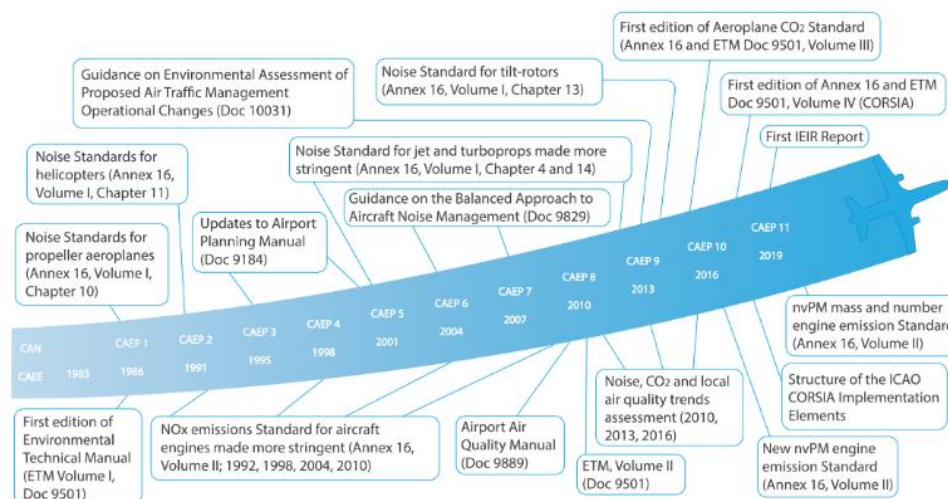
Creado en 1983, el CAEP es un Comité Técnico del Consejo perteneciente a la OACI que se encarga de los asuntos relacionados con el medio ambiente y está formado por actualmente 27 miembros propuestos de diferentes Estados miembros de la OACI y 19 observadores ("La Aviación Civil Argentina y el Cambio Climático", 2010).

El CAEP ayuda al Consejo a elaborar nuevas políticas y SARP's relacionados con el ruido y las emisiones de las aeronaves y con el impacto medioambiental de la aviación en general. Concretamente, realiza

actividades relacionadas con el ruido, la calidad del aire local y medidas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> incluidas aquellas referentes a la tecnología de las aeronaves, la mejora operativa de las mismas, los combustibles sostenibles y las medidas basadas en el mercado como CORSIA ("Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP)", 2020).

Dentro del CAEP, el Grupo de Trabajo más relevante para este trabajo, es el **WG3** que se encarga del rendimiento de las aeronaves, las cuestiones técnicas de emisión, y el desarrollo de una nueva normativa o estándares de CO<sub>2</sub> de las aeronaves, actualizando Anexo 16 – Volumen II y III ("Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP)", 2020). Algunos de los hitos normativos de este Comité se muestran en la siguiente Figura 4.34:

Figura 4.34: Evolución de la normativa elaborada por el CAEP.



Fuente: Obtenida de la página web oficial de OACI (2020).

En lo referente a la normativa publicada por el CAEP, y que afecta a lo mencionado en este trabajo podemos destacar las siguientes:

- **Anexo 16 Volumen II.** Sobre Emisiones de los motores de las aeronaves.
- **Anexo 16 Volumen III.** Sobre las Emisiones de CO<sub>2</sub> de las aeronaves.
- **Documento 9501.** Manual técnico ambiental Volúmenes II y III sobre procedimientos para la certificación de las emisiones de los motores de aeronaves y Procedimientos para la Certificación de Emisiones de CO<sub>2</sub> de Aviones.
- **Documento 9887.** Informe de expertos independientes sobre la revisión de LTTG NOx y los objetivos tecnológicos a medio y largo plazo para NOx (2008).
- **Documento 9953.** Informe de expertos independientes al CAEP/8 sobre la segunda revisión de NOx y los objetivos tecnológicos a medio y largo plazo para NOx (2010).



- **Documento 9963.** Informe de expertos independientes sobre los objetivos a medio y largo plazo para la reducción de la quema de combustible de aviación a partir de la tecnología (2010).

También es importante destacar lo referente a la normativa relacionada con las **especificaciones de los biocombustibles**, puesto que es la manera que tienen tanto los productores como consumidores para controlar el buen funcionamiento y rendimiento del producto (Esono Eyenga, 2013).

Las principales entidades dedicadas al mantenimiento de estas especificaciones son la ASTM y la UK MOD (United Kingdom Ministry of Defense) en Inglaterra (Esono Eyenga, 2013).

#### 4.6.5. American Society for Testing and Materials (ASTM)

Las certificaciones elaboradas por la American Society for Testing and Materials (**ASTM**) son necesarias para los procesos de producción y aprobación de combustibles. Esta organización se encarga de evaluar los datos de ensayos de combustibles y establecer los criterios de especificación de combustibles de aviación alternativos ("CAAF/2-WP", 2017).

Al igual que el Jet-A1 debe cumplir una serie de requisitos recogidos en el **ASTM D1655**, en el **Defense Standard 91-91** en el Reino Unido o las especificaciones indicadas por la IATA. Los biocombustibles deben cumplir una serie de requisitos, o especificaciones similares a las Jet-A1 para poder utilizarse como combustibles "Drop-In" ("Capítulo 6. Jet-A1", 2020).

Según indicaron en el CAAF/2, para facilitar el proceso de certificación, la ASTM publicó dos normas:

- **ASTM D4054** *"Práctica normalizada de homologación y aprobación de nuevos combustibles y aditivos para combustibles para turbinas de aviación"*. Según indican en el informe elaborado por el CAAF/2, esta norma se desarrolló para orientar a los productores de combustibles alternativos sobre los ensayos y las propiedades necesarias a la hora de evaluar un nuevo combustible para aviación alternativo ("CAAF/2-WP", 2017).
- **ASTM D7566** *"Especificación normalizada de combustibles para turbinas de aviación con hidrocarburos sintéticos"*. Mediante esta norma, publicada en 2009. Se definen los requisitos en

términos de propiedades y composición de los componentes de mezclas sintéticas que pueden combinarse con combustible convencional derivado del petróleo. Gracias a ella, cada vez que se incorpora un nuevo combustible a la misma, queda aprobado su uso en todas las aeronaves certificadas para operar con combustible Jet A ("CAAF/2-WP", 2017).

Adicionalmente, podemos destacar las especificaciones recogidas en el **ASTMD6866** *"Métodos de prueba estándar para determinar el contenido de base biológica de muestras sólidas, líquidas y gaseosas mediante el análisis de radiocarbono"* (ASTM, 2020):

- **ASTM D6866:** Mediante este método, se determina el contenido de carbono de origen biológico de una muestra, en este caso líquida utilizando el análisis de radiocarbono. Por tanto, el método ASTM D6866 determina el porcentaje exacto de combustible derivado de fuentes renovables que se puede mezclar ("ASTM D6866 contenido de carbono, combustibles", 2020).

#### 4.6.6. Normativa Europea. EASA

Sobre la normativa europea, podemos destacar la **Directiva de Energía Renovable (RED)** elaborada por el Parlamento Europeo y el Consejo, y adoptada en 2009. Esta Directiva estableció un marco político general para la producción y promoción de energía procedente de fuentes renovables en la Unión Europea.

Mediante la misma, trata de asegurar de que al menos el 10% de la energía producida en los países miembros de la Unión Europea provenga de fuentes renovables para 2020.

Por otro lado, incluye multiplicadores sobre la producción de biocombustibles, para fomentar el uso de los mismos, y limita la producción de aquellos procedentes de cultivos de especies comestibles o destinadas a la industria alimentaria. Asimismo, la **Directiva 2009/28/CE** establece los criterios de sostenibilidad ambiental que deben cumplir los biocombustibles, como por ejemplo (Esono Eyenga, 2013):

- El ahorro de emisiones de gases efecto invernadero al menos 50% desde 2017.
- Los materiales utilizados no deben provenir de terrenos con elevada biodiversidad o suelo con alto contenido en carbono.
- Limitación del uso de materias primas procedentes de la agricultura, siguiendo las normas y requisitos ambientales aplicables a los agricultores.

- Los países de donde procedan las materias primas deben ratificar e implementar convenios para proteger los derechos de los trabajadores, la bioseguridad y las especies amenazadas.

En el año 2015, esta Directiva fue modificada para reconocer una “**opción voluntaria de aviación**” adhiriéndose a la normativa nacional de cada país miembro. Sin embargo, tanto Países Bajos y Reino Unido la incorporaron. Posteriormente se realizó otra modificación, mediante la cual se indicaba que los proveedores de combustibles tiene que asegurar que al menos el 14% de la energía usada en el sector transportes de la UE provenga de fuentes energía renovables para el 2030 y otras modificaciones ("Policy actions | European Aviation Environmental Report", 2020).

Cabe destacar que según indican en la página EUR-Lex, esta Directiva tendrá validez hasta mediados de 2021, cuando será derogada por la **Directiva (UE) 2018/2001** del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (EUR-Lex, 2020).

#### Estándares medioambientales inteligentes

Por otro lado, existen los denominados **estándares inteligentes** mediante los cuales se permite alcanzar los objetivos medioambientales con costes mínimos. Mediante estos estándares de especificaciones técnicas, EASA pretende garantizar la investigación y la mejora de las tecnologías empleadas en los diseños de aviones y motores para la reducción de ruido y emisiones. Dentro de esos estándares podemos destacar las Especificaciones de Certificación CS-34 y CS-36 relativa a las emisiones de gases y ruido respectivamente, de las aeronaves ("Smart environmental standards | EASA", 2020).

#### 4.7 IMPACTO AMBIENTAL FUTURO DEL SECTOR. ESCENARIOS

Como hemos podido comprobar recientemente tras la situación provocada por el Covid-19, si no cambiamos e introducimos medidas efectivas en el sector de la aviación, la única manera para reducir las emisiones de gases efecto invernadero que esta produce a los niveles objetivos, será mediante la reducción drástica del tráfico aéreo que, como indican en McKinsey & Company se ha reducido un 75% desde el mes de abril (Ditcher et al., 2020).

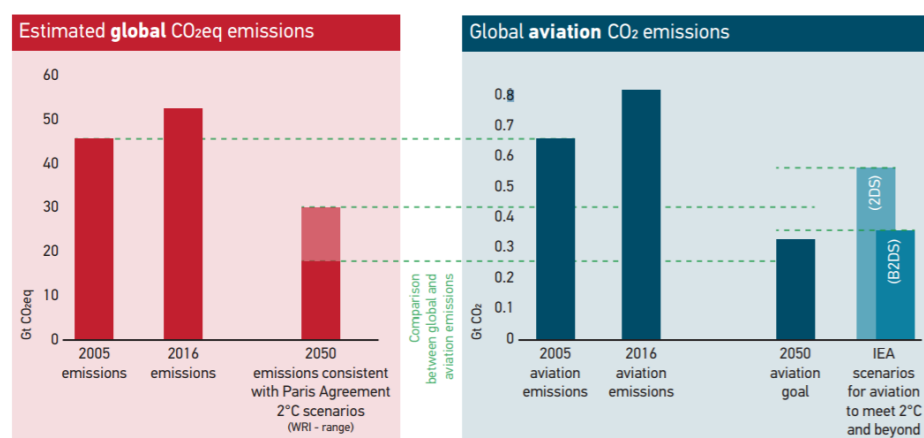
Recordemos que a mayo de 2020, 16.184 aeronaves de las 29.324 registradas o contabilizadas por IATA, están paralizadas (Pearce, 2020).

Por otro lado, las previsiones sobre el crecimiento del tráfico aéreo, que estimaban un crecimiento del 4% de manera anual, se han visto totalmente obsoletas. Y no se sabe cuánto tiempo se prolongará esta disminución ni la cuantía de la misma, ya que depende de factores externos a la industria aeronáutica (Ditcher et al., 2020).

De la misma manera, las previsiones sobre las emisiones de GEI, también se verán drásticamente modificadas, reflejando la evolución de la demanda del tráfico aéreo y sus emisiones post-Covid 19.

De manera anterior a la situación actual, en marzo de 2019, ATAG publicó las siguientes estimaciones sobre las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. En estas, se valoraba las emisiones de CO<sub>2</sub> que se realizarían, en el supuesto de que se alcancen los objetivos impuestos por el Acuerdo de París ("AVIATION 2050 GOAL AND THE PARIS AGREEMENT", 2020).

Figura 4.35: Emisiones estimadas de CO<sub>2</sub> a nivel mundial y de la aviación.



Fuente: Obtenida de la página web Aviation Benefits Beyond Borders (2020).

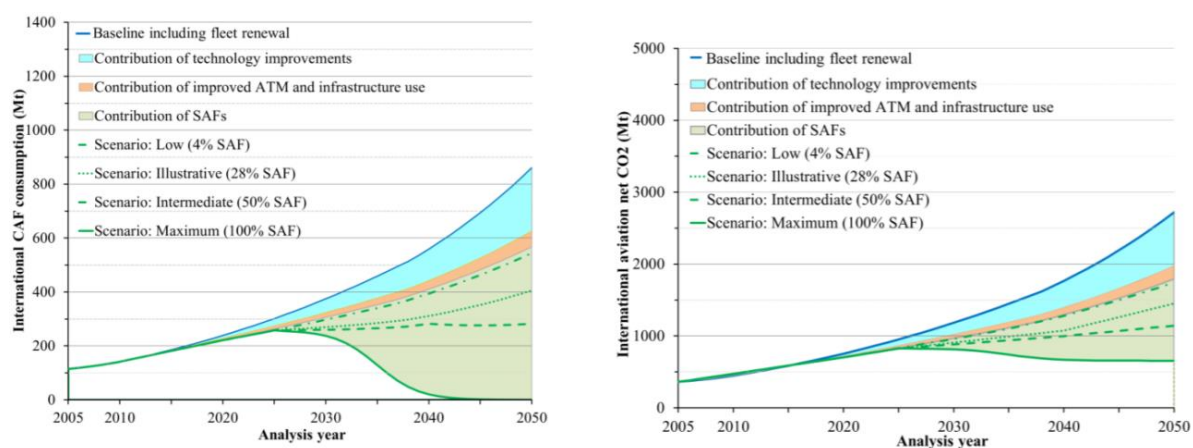
Al margen de esto, la conversión o transición energética de la aviación es evidentemente necesaria, para poder impulsar un medio de transporte sostenible y así cumplir las pautas marcadas por los diferentes organismos y entidades involucradas, así como las marcadas por el Acuerdo de París.

Por este motivo, algunas de las principales organizaciones del sector de la aviación, han generado estimaciones sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en base al porcentaje de biocombustibles usado durante los próximos.

Un ejemplo de ello, sería el elaborado por OACI mostrado en la segunda **Conferencia sobre la Aviación y los Combustibles Alternativos (CAAF/2)**.

En la siguiente Figura 4.36, manteniendo las previsiones sobre la introducción de mejoras tecnológicas, la mejora del uso de las infraestructuras y el servicio ATM y la renovación de las flotas de aeronaves y partiendo del consumo de 142 millones de toneladas métricas de combustible. Se valora la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la aviación internacional, en cuatro escenarios en función del porcentaje de biocombustibles utilizado por las aerolíneas y su evolución en los próximos 30 años (CAAF/2, 2017).

Figura 4.36: Previsiones de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la aviación internacional (2005-2050)



Fuente: Obtenida del informe elaborado por CAAF/2 – OACI (2017).

De esta Figura 4.36 podemos apreciar que, mantenido las otras variables mencionadas anteriormente, si no se consume al menos el 28% de biocombustibles frente al consumo total, la reducción de las emisiones apenas será notable. Por otro lado, si a partir del año 2040 se mantiene ese porcentaje, cómo se puede comprobar, las emisiones volverán a crecer.

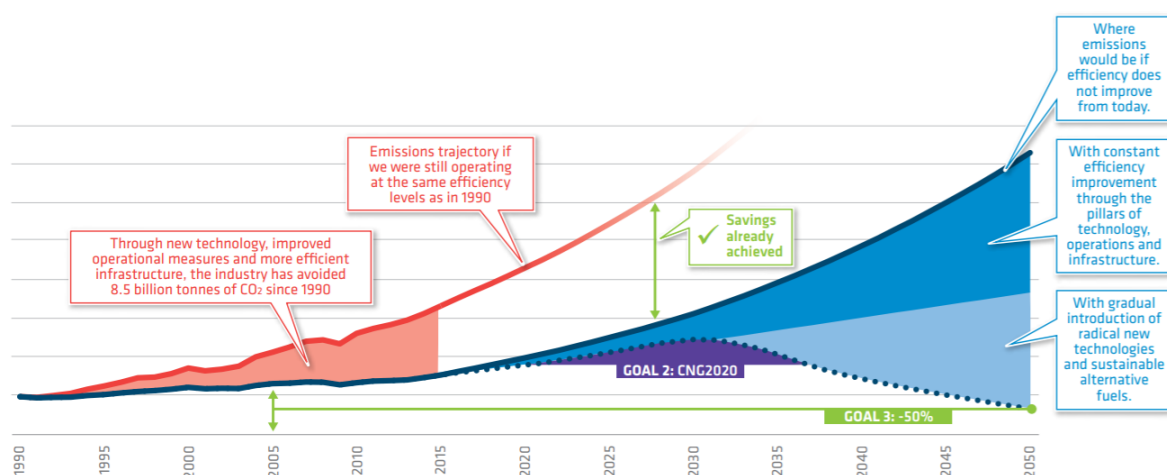
Por este motivo, para reducir de manera real las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de este tipo de aviación. Se deberían introducir planes de acción realistas, mediante los cuales mantener **como mínimo un consumo de biocombustibles del 4%** que debería ir ascendiendo paulatinamente hasta alcanzar **al menos el 28%** para el año 2040, fecha a partir de la cual ese porcentaje debería subir para seguir notando la reducción de emisiones y los beneficios de la utilización de combustibles sostenibles (CAAF/2, 2017).

Adicionalmente, y como se puede apreciar, a partir del 2040, la curva de reducción de emisiones se mantendría estable en el caso de que los biocombustibles abarcaran el 100%, habiendo conseguido una reducción del 63% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, en unas condiciones de máxima productividad y disponibilidad agrícola (CAAF/2, 2017). Es aquí donde se ve la necesidad de introducir otros medios de propulsión como los mencionados a lo largo de este trabajo, para poder seguir reduciendo esas emisiones, variando entonces la capacidad de reducción de emisiones representadas por la región azul.

Por último cabe destacar que para poder conseguir el 100% de uso combustibles sostenibles, según indicaron en el CAAF/2 sería necesaria la construcción de aproximadamente 170 biorrefinerías en 30 años, (en 2017 existían tan solo 70) con un coste aproximado de 15.000 millones a 60.000 millones de dólares al año (crecimiento lineal) (CAAF/2, 2017).

Finalmente, en la Figura 4.37, elaborada por la organización Aviation Benefits Beyond Borders, se muestra además, las emisiones de CO<sub>2</sub> que habría en el caso de que no se hubiera producido la mejora en la eficiencia respecto al consumo de combustible.

Figura 4.37: Emisiones de CO<sub>2</sub> elaborado por ABBB.



Fuente: Obtenida del informe Beginner's Guide to SAF 2017 (ATAG).



## 5. CONCLUSIÓN

---

Como conclusión de este Trabajo de Fin de Grado, en primer lugar consideramos que queda evidente la importancia del transporte aéreo en el panorama actual. Puesto que, como hemos ido comentando a lo largo del cumplimiento de este trabajo, el transporte aéreo es un sector estratégico para el desarrollo económico a nivel mundial. Siendo un potenciador del sector terciario, dominante en países como España. Y aportando en 2016, el 3,5% del PIB global, según datos de ATAG.

Por otro lado, no es ninguna novedad el problema medioambiental al que el ser humano, como parte del ecosistema, se enfrenta. La contaminación atmosférica según indica la Organización Mundial de la Salud, es culpable de efectos visibles tanto a corto como a largo plazo, aumentando la probabilidad de padecer enfermedades respiratorias agudas o crónicas (como neumonía, cáncer de pulmón...) o incluso enfermedades cardiovasculares que causan el fallecimiento de aproximadamente 1,3 millones de personas en todo el mundo (OMS, 2020).

Por este motivo, y debido al momento sin precedentes que estamos viviendo, es significativo señalar que la contaminación atmosférica, podría incluso empeorar la tasa de mortalidad del COVID-19, en aquellos lugares en los que la exposición prolongada a partículas menores a 2,5 micras (PM2.5) aumentara. Según estudios realizados por investigadores de la Universidad de Harvard (Hornyak, 2020).

También es importante precisar que somos conscientes de que la entrada de esta enfermedad en el panorama actual, ha cambiado la situación del sector aeronáutico, así como muchos otros, de manera drástica y que con total probabilidad, sin la aplicación de medidas políticas aún más críticas a las previstas, las estimaciones relativas a fechas para la consecución de la necesaria transición energética, se verán aplazadas. Empeorando la situación medioambiental del sector.

Independientemente, si bien es cierto que el porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> aportado por el sector aeronáutico, es relativamente menor, a los aportados por otros sectores como, el sector industrial. Ello no es motivo, para no tratar de reducir dichas emisiones y potenciar la sostenibilidad del sector. Que entre otros motivos, aporta una imagen negativa soportada por el transporte aéreo, y que puede generar un cambio desfavorable en los hábitos de los consumidores de las aerolíneas (Jiménez Crisóstomo, 2017).



Durante la realización de este trabajo, si bien se han podido apreciar las posibilidades y el potencial que muestran las diferentes formas de propulsión analizadas, para convertir la aviación y otros medios de transporte en modelos más sostenibles, reduciendo las emisiones del mismo o incluso eliminándolas. También se ha podido apreciar la gran inversión tanto económica como de investigación que ello requiere. Y tras la lectura de diversos informes, artículos, páginas web, y demás, así como la consulta a expertos del sector, todos ellos coinciden en la inevitable y necesaria inversión en I+D+i, para lograr dicha sostenibilidad.

Por otro lado, las aeronaves que están volando actualmente, son aeronaves que tienen aproximadamente un tiempo promedio de actividad de 25 años. Y los principales fabricantes de aeronaves, tienen estimada la producción de los próximos 20 años. Lo que supone que, cuando se terminen de fabricar esas aeronaves estarán otros 25 años en funcionamiento, con la emisión de gases que ello conlleva. Dado que, si bien es cierto que cada generación de aeronaves es más eficiente que la anterior, sabemos que esto no es suficiente para reducir las emisiones.

De manera adicional, y debido en parte a la incapacidad del sector aéreo para reducir sus emisiones de manera notable mediante las mejoras de tecnología y operaciones, se han creado sistemas de comercio de emisiones, como el Emissions Trading System (ETS) de la Unión Europea, que tiene la finalidad última de alcanzar los objetivos de reducción de emisiones asumidos por la Unión Europea mediante el Protocolo de Kioto. O por ejemplo, la creación del Plan de Compensación y Reducción de Emisiones de Carbono de la Aviación Internacional (CORSIA), una medida pensada para compensar las emisiones de la aviación internacional y estabilizar los niveles de dichas emisiones a partir de este 2020, a través de la compra y cancelación de unidades de emisión del mercado mundial del carbono por los explotadores aéreos.

Sin embargo, la implantación de estas medidas, tal y como indica Jiménez Crisóstomo (2017), supone el reconocimiento de que el sector por sí solo no llegará a la neutralidad de emisiones. Asimismo, existen corrientes que dudan de su efectividad real. Sin ir más lejos, la adhesión por parte de los Estados, al Plan CORSIA, es voluntaria durante su fase piloto y primera fase, es decir hasta 2026. Y adicionalmente, países como Rusia, India o China no han confirmado su adhesión.

Sobre los biocombustibles, si bien hemos visto que existen numerosas aerolíneas que ya cuentan con los mismos. Todavía hay muchas compañías aéreas que aún no los utilizan, posiblemente por motivos logísticos, ya que hemos visto que si bien existen varias empresas que se dedican a su producción, tan solo son cinco los aeropuertos en todo el mundo, que ofrecen este tipo de combustibles, poniendo de manifiesto la necesidad de reforzar la estructura productiva. O por motivos económicos, puesto que los precios elevados de los mismos son una fuerte barrera para su utilización, que pueden acabar repercutiéndose en el precio de los billetes, pues como bien sabemos, las compañías aéreas tienen escasos márgenes de beneficio.

Es aquí donde entra la importancia y la necesidad de una regulación u ordenamiento jurídico nacional e internacional (preferiblemente unificado), que otorgue a la sostenibilidad, la importancia que requiere. Con una posición más proactiva hacia el consumo de combustibles sostenibles. Ya sea mediante incentivos fiscales para reducir su precio final, o para facilitar su distribución e inclusión en las infraestructuras aeroportuarias. O mediante medidas negativas por el consumo de combustibles fósiles o a través de objetivos de consumo y reducción de emisiones más ambiciosos.

Volviendo a los precios de los billetes, como hemos observado mediante algunos ejemplos mostrados a lo largo de este trabajo. Sabemos que actualmente, existen aerolíneas que promocionan la venta de billetes a un precio ligeramente superior justificando el uso de biocombustibles. No obstante, esta medida se puede contemplar de manera negativa por parte de los consumidores finales, obteniendo el objetivo contrario.

Es por ello que se considera, que esta medida debería sobrepasarse, mediante el planteamiento de otras opciones más efectivas. Como por ejemplo la venta de vuelos realizados únicamente con biocombustibles, aunque pueda conllevar la pérdida de un segmento de consumidores. O por medio del ofrecimiento de beneficios adicionales, que el consumidor perciba de manera positiva y le incentive para la compra de vuelos realizados mediante biocombustibles, como por ejemplo, un programa de puntos mejorado o el ofrecimiento de servicios adicionales ya sea de manera gratuita o mediante una rebaja.

A pesar de todo, también hemos podido apreciar que, tanto el consumo de biocombustibles como la existencia de mercados de emisiones, son medidas útiles a corto plazo. Ya que, ni utilizando el 100% de combustibles sostenibles en aviación, se conseguirá la reducción de emisiones de gases efecto

invernadero, si se produce el crecimiento esperado del tráfico aéreo. Ya que hasta hace tan solo unos meses la demanda seguía creciendo de manera más rápida que los avances tecnológicos en el sector.

A partir de ese punto que se podría dar, si se mantienen dichas previsiones de crecimiento, en los próximos 20 años, la inclusión de las aeronaves eléctrico-híbridas, se ve más que necesaria para lograr la transición energética del sector.

Sin embargo, una vez desarrollada esa tecnología, existe un elemento que en ninguna de las páginas web, guías de entidades expertas, artículos, trabajos de fin de carrera o libros utilizados como base para la realización de este trabajo, se ha visto. Y es el precio de esas aeronaves eléctrico-híbridas.

Consideramos que este también es un factor a tener en cuenta puesto que, para las fechas de puesta en servicio de este tipo de aeronaves, las aerolíneas seguramente habrán realizado su inversión correspondiente en el mantenimiento y renovación de sus respectivas flotas. Por lo que, de manera muy probable, necesitaran algún tipo de incentivo por parte de una entidad gubernamental o aeronáutica, ya sea económico o legal, para la adquisición de este tipo de aeronaves, al igual que sucede con los combustibles sostenibles.

Todo ello en vista de que, su principal incentivo a día de hoy, sería la reducción de los costes derivados del combustible y que como sabemos, supone el mayor gasto de las aerolíneas. Y con total probabilidad realizarán balances económicos, para calcular la cuantía del ahorro monetario de los costes de combustibles, frente a la adquisición de una aeronave eléctrico-híbrida.

Para finalizar, si bien las expectativas para la generación de un cambio notable del paradigma energético en la propulsión de las aeronaves son, a medio y largo plazo (que incluso se podrían alargar debido a la situación de crisis actual). El sector está adecuadamente capacitado para afrontar esos cambios tecnológicos, susceptibles de eliminar en gran medida la dependencia de los combustibles fósiles. Teniendo en cuenta la barrera que supone, la elevada inversión inicial requerida para alcanzar dichos cambios.

Y si las condiciones económicas, sociales y políticas lo favorecen, en los próximos 20-30 años, se podría efectuar la introducción de aeronaves innovadoras, que permitan el inicio de la famosa descarbonización del sector.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

---

- *Acuerdo de París - Acción por el Clima - European Commission*. Acción por el Clima - European Commission. (2020). Disponible en: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es).
- Artés, D. (2012). *Boeing SUGAR Volt: el futuro de la aviación es híbrido*. Tecmovia. Disponible en: <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/12/25/boeing-sugar-volt-el-futuro-de-la-aviacion-es-hibrido/>.
- ASTM. (2020). *ASTM D6866 - 20 Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis*. Astm.org. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D6866.htm>.
- ASTM. *ASTM D6866 contenido de carbono, combustibles*. Beta Analytic - ASTM D6866 Lab, Nitrates in Water Testing. (2020). Disponible en: <https://www.betalabservices.com/espanol/biocombustibles/astm-d6866.html>.
- AVIATION 2050 GOAL AND THE PARIS AGREEMENT. Aviationbenefits.org. (2020). Disponible en: [https://aviationbenefits.org/media/166861/fact-sheet\\_4\\_aviation-2050-and-paris-agreement.pdf](https://aviationbenefits.org/media/166861/fact-sheet_4_aviation-2050-and-paris-agreement.pdf).
- Aviation Week Network. (2019). *Pratt & Whitney GTF™ Engines Gain Market Momentum | Aviation Week Network*. Aviationweek.com. Disponible en: [https://aviationweek.com/commercial-aviation/pratt-whitney-gtf-engines-gain-market-momentum?utm\\_rid=CPEN1000000134272&utm\\_campaign=22123&utm\\_medium=email&elq2=7fe660520c7c4a91ad37b7d7415792e5](https://aviationweek.com/commercial-aviation/pratt-whitney-gtf-engines-gain-market-momentum?utm_rid=CPEN1000000134272&utm_campaign=22123&utm_medium=email&elq2=7fe660520c7c4a91ad37b7d7415792e5).
- *Aviation's Energy Transition. Fact Sheet #5*. Aviationbenefits.org. (2020). Disponible en: [https://aviationbenefits.org/media/166902/fact-sheet\\_5\\_aviations-energy-transition.pdf](https://aviationbenefits.org/media/166902/fact-sheet_5_aviations-energy-transition.pdf).
- AviationPros. *ZeroAvia Emerges From Stealth With the Largest Zero-Emission Airplane Flying Today*. Aviation Pros. (2019). Disponible en: <https://www.aviationpros.com/engines-components/aircraft-engines/electric-green-engine-technology/press-release/21092816/zeroavia-emerges-from-stealth-with-the-largest-zeroemission-airplane-flying-today>.
- Baeza, M. (2012). *Los combustibles más energéticos*. Coche Eléctrico. Disponible en: <https://blogs.elpais.com/coche-electrico/2012/12/los-combustibles-mas-energeticos.html>.
- *Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel*. Aviationbenefits.org. (2020). Disponible en: [https://aviationbenefits.org/media/166152/beginners-guide-to-saf\\_web.pdf](https://aviationbenefits.org/media/166152/beginners-guide-to-saf_web.pdf).
- *Benefits - Pratt & Whitney Geared Turbofan*. Pratt & Whitney Geared Turbofan. (2020). Disponible en: <https://pwgtf.com/benefits/>.

- Benito & Benito (2012). *Descubrir el Transporte Aéreo y el Medio Ambiente*. (AENA, Ed.). Madrid: AENA.
- *Biocombustibles para la aviación, ASTM D6866 análisis*. Beta Analytic - ASTM D6866 Lab, Nitrates in Water Testing. (2020). Disponible en: <https://www.betalabservices.com/espanol/biocombustibles/combustibles-para-aviacion.html>.
- Boeing: 2014 Environment Report. Boeing.com. (2014). Disponible en: [http://www.boeing.com/aboutus/environment/environment\\_report\\_14/2.3\\_future\\_flight.html](http://www.boeing.com/aboutus/environment/environment_report_14/2.3_future_flight.html).
- Burzlaff, M. (2017). *Aircraft Fuel Consumption – Estimation and Visualization* (Licenciatura). Faculty of Engineering and Computer Science Department of Automotive and Aeronautical Engineering.
- CAAF/2. (2017). *TENDENCIAS Y ESCENARIOS SOBRE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS*. Icao.int. Disponible en: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF.2.WP.006.4.es.Rev.pdf>.
- CAAF/2. CONFERENCIA SOBRE LA AVIACIÓN Y LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS. LOGROS Y DESAFÍOS DEL PROCESO DE CERTIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS. Icao.int. (2017). Disponible en: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF.2.WP.017.1.es.pdf>.
- CAAF/2. CONTRIBUTIONS FROM AIRPORTS TO THE SUPPLY OF SUSTAINABLE AVIATION FUELS (SAFs). OACI. (2017). Disponible en: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF.2.WP.022.2.en.pdf>.
- Capítulo 6. Jet-A1. Repsol.com. (2020). Disponible en: [https://www.repsol.com/comunes/archivos/cap6mod\\_71243.pdf](https://www.repsol.com/comunes/archivos/cap6mod_71243.pdf).
- Clarke, C. (2018). *The Very Best Light Jets in the Sky Today*. Popular Mechanics. Disponible en: <https://www.popularmechanics.com/flight/g21098242/best-light-jet-airplanes/>.
- Comisión Europea. CORDIS | European Commission. Cordis.europa.eu. (2019). Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/211485/es>.
- Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP). Icao.int. (2020). Disponible en: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Caep.aspx>.
- Ditcher, A., Henderson, K., Riedel, R., & Riefer, D. (2020). *How airlines can chart a path to zero-carbon flying*. McKinsey & Company. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-transport-and-logistics/our-insights/how-airlines-can-chart-a-path-to-zero-carbon-flying?cid=other-eml-alt-mip-mck&hlkid=ee0f780eab5449919f9850d77af88c7f&hctky=9810878&hdpid=6f7522a2-4e18-42db-95fd-1d69b3f7259e#>.

- EASA. *Bio-based aviation fuels* | *European Aviation Environmental Report*. Easa.europa.eu. (2020). Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/bio-based-aviation-fuels>.
- EASA. *Smart environmental standards* | | EASA. EASA. (2020). Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/smart-environmental-standards#group-easa-related-content>.
- *Efficient technology. Electric Aircraft*. Aviationbenefits.org. (2020). Disponible en: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/efficient-technology/>.
- El País (2016). *Así es el Solar Impulse II y su vuelta al mundo*. EL PAÍS. Disponible en: [https://elpais.com/economia/2016/06/23/actualidad/1466678049\\_614291.html](https://elpais.com/economia/2016/06/23/actualidad/1466678049_614291.html).
- *Electric and Hybrid Aircraft Platform for Innovation (E-HAPI)*. Icao.int. (2020). Disponible en: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx>.
- Esono Eyenga, P. (2013). *Compatibilidad de materiales con las mezclas de bioqueroseno de coco, babasú y palmiste con queroseno convencional* (Ingeniería). Dep de Ingeniería Química y Combustibles. Universidad Politécnica de Madrid.
- EUR-Lex. *Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. Eur-lex.europa.eu. (2009). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028>.
- Europa Press. *La flota mundial de aviones alcanzará las 39.000 aeronaves en 2030, según Oliver Wyamn*. europapress.es. (2020). Disponible en: <https://www.europapress.es/turismo/transportes/aerolineas/noticia-flota-mundial-aviones-alcanzara-39000-aeronaves-2030-oliver-wyamn-20200227122321.html>.
- EVIATION AIRCRAFT. *AIRCRAFT* | *Eviation*. Eviation.co. (2020). Disponible en: <https://www.eviation.co/aircraft/>.
- *'Flight shame' could halve growth in air traffic*. BBC News. (2019). Disponible en: <https://www.bbc.com/news/business-49890057>.
- Frey, S., R&D Fellow, & Honeywell/UOP. (2017). *The Future of Flight: Advanced Renewable Jet Fuels*. ACS Webinar. Acs.org. Disponible en: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/events/technology-innovation/Slides/2017-02-02-iss1-renewable-biofuels.pdf>.
- Ganduglia, F. (2009). *Manual de Biocombustibles*. Olade.org. Disponible en: [http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual\\_Biocombustibles\\_ARPEL\\_IICA.pdf](http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual_Biocombustibles_ARPEL_IICA.pdf).

- García, G. (2020). *Un motor eléctrico de 1,5 MW moverá los aviones eléctricos de EasyJet*. Híbridos y Eléctricos. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/motor-electrico-15-mw-movera-aviones-electricos-easyjet/20200203125148032896.html>.
- GlobalAir. *Gulfstream G450 Specifications, Cabin Dimensions, Speed*. GlobalAir.com. (2020). Disponible en: <https://www.globalair.com/aircraft-for-sale/Specifications?specid=730>.
- Goater, L., Buffle, J., & Andrews, C. (2015). *Aviation Climate Solutions* [Ebook] (pp. 22-40, 50-60). Air Transport Action Group. Disponible en: <http://www.enviro.aero/climatesolutions>.
- Hermoso, C., & Ramírez, R. (2003). *La industria Aeroespacial 2003*. (pp. 1-26). Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <https://www.aero.upm.es/departamentos/economia/investiga/informe2003/archivos.pdf/4.6.pdf>.
- Hornyak, T. (2020). *La Contaminación del Aire Puede Empeorar la Tasa de Mortalidad por COVID-19* - Eos. Eos. Disponible en: <https://eos.org/articles/la-contaminacion-del-aire-puede-empeorar-la-tasa-de-mortalidad-por-covid-19>.
- IATA. (2019). *WATS. World Air Traffic Statistics 2019* (pp. 7-9, 37-41). Montreal - Geneva: 2019 International Air Transport Association.
- JAXA. Aviation Program Group. *Research and development on hypersonic turbojet engine*. (2019). (pp. 1-2). Disponible en: [http://www.aero.jaxa.jp/publication/pamphlets/pdf/hst\\_en\\_fr.pdf](http://www.aero.jaxa.jp/publication/pamphlets/pdf/hst_en_fr.pdf).
- Jiménez Crisóstomo, A. (2017). *Análisis de la Sostenibilidad Energética del Transporte Aéreo y su Impacto en el Turismo*. (Máster Universitario en Turismo Sostenible y TIC). Universitat Oberta de Catalunya. Estudios de Economía y Empresa.
- Jiménez Crisóstomo, A., Rubio-Andrada, L. Celemin-Pedroche, M. (2019). *“La rigidez del paradigma energético del transporte aéreo”*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Jódar, F. (2020). *X-57 Maxwell, el avión eléctrico de la NASA*. MuyInteresante.es. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/tecnologia/articulo/x-57-maxwell-el-avion-electrico-de-la-nasa-861466402526>.
- Kinder, J., & Rahmes, T. (2009). *Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosenes (Bio-SPK)*. Safug.org. Disponible en: <http://www.safug.org/assets/docs/biofuel-testing-summary.pdf>.
- *La Aviación Civil Argentina y el Cambio Climático*. Icao.int. (2010). Disponible en: <https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/Env-Seminars-Lima-Mexico/Lima/Argentina-CAEP.pdf>.
- *La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*. Miteco.gob.es. (2020). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/CMNUCC.aspx>.



- Lükewille, A. (2018). "Las emisiones de la aviación y del transporte marítimo en el punto de mira". European Environment Agency. From: <https://www.eea.europa.eu/es/articles/las-emisiones-de-la-aviacion>.
- Marechal Electric. *Toma eléctrica industrial sector aeroportuario* | MARECHAL ELECTRIC. Marechal.com. (2020). Disponible en: <https://marechal.com/marechal/es/p-aeropuertos.html>.
- Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Protocolo de Kioto*. Miteco.gob.es. (2020). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/protocolo-kioto.aspx>
- Monteagudo, C. (2019). *Skydweller, la primera empresa en instalarse en el aeropuerto, construirá aviones solares no tripulados* - Lanza Digital. Lanza Digital. Disponible en: <https://www.lanzadigital.com/provincia/ciudad-real/skydweller-la-primera-empresa-en-instalarse-en-el-aeropuerto-construira-aviones-solares-no-tripulados/>.
- Nelson, E. (2017). *Alternative Fuels and Green Aviation*. ResearchGate. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/319765981\\_Alternative\\_Fuels\\_and\\_Green\\_Aviation](https://www.researchgate.net/publication/319765981_Alternative_Fuels_and_Green_Aviation).
- OACI. *Fast Facts. ICAO Global Framework for Aviation Alternative Fuels*. Icao.int. (2020). Disponible en: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/default.aspx>.
- OMS. (2020). *OMS | Los efectos sobre la salud*. Who.int. Disponible en: [https://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/health\\_impacts/es/](https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/).
- ONU. *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. (2015). Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Orús, A. (2019). *Tráfico aéreo: tasa de crecimiento de pasajeros 2019-2038* | Statista. Statista. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/600393/trafico-aereo-prevision-de-las-tasas-de-crecimiento-de-pasajeros/>.
- *Our decarbonisation journey continues: looking beyond E-Fan X*. Airbus. (2020). Disponible en: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/our-decarbonisation-journey-continues.html>.
- Parking, R. (2018). *5 aviones comerciales más utilizados* - Royal Parking. Royal Parking Alicante. Disponible en: <https://royalparking.es/5-aviones-comerciales-mas-utilizados/>.
- Pearce, B. (2020). *COVID-19. Cost of air travel once restrictions start to lift*. Iata.org. Disponible en: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/covid-19-cost-of-air-travel-once-restrictions-start-to-lift/>.
- Peeters, P., Middel, J., & Hoolhorst, A. (2005). *Fuel efficiency of commercial aircraft Fuel efficiency of commercial aircraft An overview of historical and future trends*. Transportenvironment.org. National

- |           |            |      |            |     |
|-----------|------------|------|------------|-----|
| Aerospace | Laboratory | NLR. | Disponible | en: |
|-----------|------------|------|------------|-----|
- [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2005-12\\_nlr\\_aviation\\_fuel\\_efficiency.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2005-12_nlr_aviation_fuel_efficiency.pdf).
- Planelles de Pablo, N. (2017). *Rumbo a una aviación sostenible*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Autónoma de Madrid.
  - *Policy actions | European Aviation Environmental Report*. Easa.europa.eu. (2020). Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/policy-actions>.
  - *Potentials of Power-to-Liquid fuels in aviation*. Bauhaus Luftfahrt. (2020). Disponible en: <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/en/research/alternative-fuels/potentials-of-power-to-liquid-fuels-in-aviation/>.
  - *Raising the Bar: NRDC'S 2017 Aviation Biofuels Scorecard*. Nrdc.org. (2017). Disponible en: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/aviation-biofuels-sustainability-scorecard-2017.pdf>.
  - Ramón Vilarasau, D. (2015). *INICIATIVAS VERDES, una cuestión de supervivencia para la industria aérea*. Thinktur.org. Disponible en: [https://www.thinktutur.org/media/INICIATIVAS\\_VERDES\\_una\\_cuestion\\_de\\_supervivencia\\_para\\_la\\_industria\\_aerea.pdf](https://www.thinktutur.org/media/INICIATIVAS_VERDES_una_cuestion_de_supervivencia_para_la_industria_aerea.pdf).
  - Ramón, D. (2019). *Una aerolínea española se incorpora al desarrollo de aviones híbridos | Transportes*. Hosteltur.com. Disponible en: [https://www.hosteltur.com/131276\\_una-aerolinea-espanola-se-incorpora-al-desarrollo-de-aviones-hibridos.html?code=home-page%7b2019-09-16%7d&utm\\_source=newsletter-es&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=la-industria-aerea-marca-en-2018-records-de-conectividad-y-eficiencia-hosteltur-16-09-2019&utm\\_term=20190916&utm\\_content=transportes-1](https://www.hosteltur.com/131276_una-aerolinea-espanola-se-incorpora-al-desarrollo-de-aviones-hibridos.html?code=home-page%7b2019-09-16%7d&utm_source=newsletter-es&utm_medium=email&utm_campaign=la-industria-aerea-marca-en-2018-records-de-conectividad-y-eficiencia-hosteltur-16-09-2019&utm_term=20190916&utm_content=transportes-1).
  - REPSOL. *News 03 Biocombustibles para volar más limpio*. REPSOL. (2012). Disponible en: <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/repsol-news/biocombustibles-para-volar-mas-limpio/index.cshmtl>.
  - Roberson, W., & Johns, J. (2008). *AERO - Fuel Conservation Strategies: Takeoff and Climb*. Boeing.com. Disponible en: [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_08/article\\_05\\_1.html](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_08/article_05_1.html).
  - Roca, R. (2020). *Así es el diseño final del X-57 Maxwell, el avión eléctrico de la NASA*. Elperiodicodelaenergia.com. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/asi-es-el-diseno-final-del-x-57-maxwell-el-avion-electrico-de-la-nasa/>.
  - Rofa Barragán, J. (2016). *Estudio de Emisiones Contaminantes en la Aviación Comercial y su Impacto en el Medio Ambiente* (Ingeniería). (pp. 22-50). Dep. Ingeniería Gráfica Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.

- Roth, A., & Schmidt, P. (2017). *Power-to-Liquids: A new pathway to renewable jet fuel*. Icao.int. Disponible en: [https://www.icao.int/Meetings/altfuels17/Documents/20170208\\_ROTH\\_V1-0\\_submitted.pdf](https://www.icao.int/Meetings/altfuels17/Documents/20170208_ROTH_V1-0_submitted.pdf).
- Sarrión Fernández, B. (2014). *El hidrógeno como combustible* | Beatriz Sarrión Fernández. Eoi.es. Disponible en: <https://www.eoi.es/blogs/beatrizsarion/2014/01/27/el-hidrogeno-como-combustible/>.
- SkyNRG. (2016). *ITAKA. Initiative Towards sustAinable Kerosene for Aviation*. Senasa.es. Disponible en: [https://www.senasa.es/recursos/adobePDF/2018/pdf/itaka/D3.12\\_v1.pdf](https://www.senasa.es/recursos/adobePDF/2018/pdf/itaka/D3.12_v1.pdf).
- SOLAR IMPULSE. *Solar Impulse - Around the world to promote clean technologies*. Solar Impulse. (2020). Disponible en: [https://aroundtheworld.solarimpulse.com/adventure?\\_ga=2.77485136.471859563.1586620729-745714450.1586620729](https://aroundtheworld.solarimpulse.com/adventure?_ga=2.77485136.471859563.1586620729-745714450.1586620729).
- Soldado, L. (2019). *Viabilidad técnica del All Electric Aircraft* (Ingeniería). Dpto. Ingeniería Eléctrica Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. <file:///C:/Users/MARTU/Downloads/TFG-2214-SOLDADO.pdf>
- *Stakeholder actions* | *European Aviation Environmental Report*. Easa.europa.eu. (2020). Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/stakeholder-actions>.
- Sugar Volt: Envisioning Tomorrow's Aircraft. Smithsonianmag.com. (2020). Disponible en: <https://www.smithsonianmag.com/videos/category/innovation/sugar-volt-envisioning-tomorrows-aircraft/>.
- Sustainable Aviation Fuels Guide 2017. Icao.int. (2017). Disponible en: [https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide\\_vf.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf).
- Sustainable Aviation Fuels Guide 2018. Icao.int. (2018). Disponible en: [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide\\_100519.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf).
- TheGlobalEconomy. *Consumo de combustible de aviación por país* | TheGlobalEconomy.com. TheGlobalEconomy.com. (2020). Disponible en: [https://es.theglobaleconomy.com/rankings/jet\\_fuel\\_consumption/](https://es.theglobaleconomy.com/rankings/jet_fuel_consumption/).
- Thomson, R. (2020). *Electric propulsion is finally on the map*. Roland Berger. Disponible en: <https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/Electric-propulsion-is-finally-on-the-map.html>.
- Unlu, D., & Durmaz Hilmioglu, N. (2018). *Advances in Sustainable Aviation* [Ebook] (1st ed., pp. 25-36). Springer. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/320959585\\_Review\\_of\\_Renewable\\_Biofuels\\_in\\_the\\_Aviation\\_Sector](https://www.researchgate.net/publication/320959585_Review_of_Renewable_Biofuels_in_the_Aviation_Sector).

- UOP HONEYWELL. *Commercial Flights. Honeywell UOP*. Uop.com. (2020). Disponible en: <https://www.uop.com/wp-content/uploads/2015/06/renewable-fuels-commercial-flights-green-jet.jpg>.
- Weindorf, W., Schmidt, P., Roth, A., Batteiger, V., & Riegel, F. (2016). *Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. Lbst.de. Disponible en: [http://www.lbst.de/news/2016\\_docs/161005\\_uba\\_hintergrund\\_ptl\\_barrierrefrei.pdf](http://www.lbst.de/news/2016_docs/161005_uba_hintergrund_ptl_barrierrefrei.pdf).
- World Aircraft. *Boeing 737-800 commercial aircraft. Pictures, specifications, reviews*. Airlines-inform.com. (2020). Disponible en: <https://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/boeing-737-800.html>
- *Wright Electric - Transforming the Aviation Industry with Electric Planes*. Wright Electric. (2020). Disponible en: <https://weflywright.com/>.
- X-57 Maxwell. Nasa.gov. (2020). Disponible en: <https://www.nasa.gov/specials/X57/electric-airplane.html>
- Zeroavia.com. (2020). *The First Practical True Zero Emission Aviation Powertrain*. Disponible en: <https://www.zeroavia.com/>.
- ZUNUM Aero. *Technology*. Zunum Aero. (2020). Disponible en: <https://zunum.aero/technology/>.



## ANEXOS

### ANEXO I. Objetivos de desarrollo sostenible y el impacto de la aviación en los mismos



#### No Poverty

UN Goal: end poverty in all its forms everywhere

Did you know?

UNICEF's airline partnership Change for Good has raised over

**\$160 million**

by collection coins from passengers, helping to save and improve the lives of millions of children around the world

[Learn more](#)



#### Quality Education

UN Goal: ensure inclusive and quality education for all and promote lifelong learning

Did you know?

**4 million**

students travel abroad to study each year, many by air

[Learn more](#)



#### Zero Hunger

UN Goal: end hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture

Did you know?

More than

**70,000 tonnes**

of food and commodities are delivered by air each year to relieve victims of floods, conflict and health crises

[Learn more](#)



#### Gender Equality

UN Goal: achieve gender equality and empower all women and girls

Did you know?

Women make up

**41%**

of aviation employees in Europe (although a much lower percentage in technical roles). The industry is working hard to encourage greater workforce diversity

[Learn more](#)



#### Good Health and Well-being

UN Goal: ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages

Did you know?

**99%**

of Brazil's urgent medical shipments (including organs and blood) are sent by air, free-of-charge, through a project supported by 15 Brazilian airlines

[Learn more](#)



#### Affordable and Clean Energy

UN Goal: ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all

Did you know?

**160,000**

commercial flights have already taken place using sustainable aviation fuel, with this number increasing rapidly

[Learn more](#)



#### Clean Water and Sanitation

UN Goal: ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all

Did you know?

New 'dry wash' techniques for aircraft can reduce the use of water by

**95%**

compared to traditional cleaning methods

[Learn more](#)



#### Peace, Justice and Strong Institutions

UN Goal: promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels

Air transport has a specialised United Nations agency coordinating global standards and laws to ensure a safe, secure and sustainable sector: the International Civil Aviation Organisation (ICAO)

[Learn more](#)



#### Decent Work and Economic Growth

UN Goal: promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all

Did you know?

Global air transport supports

**65.5 million jobs and \$2.7 trillion**

in global economic activity

[Learn more](#)



#### Partnerships for the Goals

UN Goal: strengthen the means of implementation and revitalise the global partnership for sustainable development

Air transport with its

**global reach**

can only work through strategic partnerships and coordinated action, including with UN agencies and governments

[Learn more](#)



## MODELOS DE PROPULSIÓN Y SU EVOLUCIÓN. Viabilidad de las energías renovables en el sector aeronáutico.

### Climate Action

UN Goal: take urgent action to combat climate change and its impacts

Did you know?

The average flight today produces

**50%**

less CO<sub>2</sub> than the same flight would have in 1990, thanks to new technology and improved efficiency

[Learn more >](#)



### Reduce Inequalities

UN Goal: reduce inequality within and among countries

Did you know?

An air ticket today costs around

**70%**

less than it did in 1970, making the benefits of air travel more accessible to more people

[Learn more >](#)



### Life Below Water

UN Goal: conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development

The main international airport of

**26 of the world's 39**

small island states is located on coastal land

[Learn more >](#)



### Sustainable Cities and Communities

UN Goal: make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable

Did you know?

**20,032**

unique city-to-city routes are served by the world's airlines, connecting urban centres and rural communities

[Learn more >](#)



### Life on Land

UN Goal: protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and biodiversity loss

Airlines and airports work with governments and environmental groups to prevent illicit wildlife trafficking

[Learn more >](#)



### Responsible Consumption and Production

UN Goal: ensure sustainable consumption and production patterns

Did you know?

**85% to 90%**

of today's aircraft (by weight) can be recycled

[Learn more >](#)



### Industry, Innovation and Infrastructure

UN Goal: build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialisation and foster innovation

Did you know?

In 2016, nearly

**\$64 billion**

was invested in airport infrastructure, mostly in Asia and the Americas

[Learn more >](#)



**ANEXO II: Proyectos de aeronaves eléctricas e híbridas**

Project	Type	Category	MTOW (KG)	Pax	Target Entry in Service	Cruise altitude (FT)	Cruise Speed (kt)	Payload (KG)	Range (KM)	Engine power (kW)
<b><u>Airbus/Siemens/Rolls Royce E-Fan X</u></b>	Hybrid-electric	Large commercial aircraft	N.A.	100	2030	N.A.	N.A.	6650	N.A.	2000
<b><u>NASA X-57 Maxwell</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	N.A.	2	2020-2021	9000	149.464	N.A.	160	60 +10
<b><u>Zunum Aero ZA10</u></b>	Hybrid-electric	business aircraft	5216.3	12	2020	max. 25,000	295	1134	1127	1000+500
<b><u>Uber Elevate</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	up to 4	2023	1,000 - 2,000	130	498.96	97	N.A.
<b><u>Lilium</u></b>	Electric	VTOL	639.6	5	2025	3300	160	200	300	320
<b><u>Pipistrel Alpha Electro</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	549.8	2	2018	N.A.	85	200	600	60
<b><u>Kitty Hawk Cora</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	2	2022	up to 3000	95	N.A.	100	N.A.
<b><u>Kitty Hawk Flyer</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	1		10	17	N.A.	10.7	
<b><u>Airbus (A^3) Vahana</u></b>	Electric	VTOL	725.7	1	2020	N.A.	95	113	100	360
<b><u>Airbus City Airbus</u></b>	Electric	VTOL	2199.2	4	2023	N.A.	59	N.A.	96	8*100
<b><u>Airbus/Audi Pop up</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	130	N.A.
<b><u>Boeing Aurora eVTOL</u></b>	Electric	VTOL	798.3	2	2020	N.A.	48.6	N.A.	N.A.	N.A.
<b><u>Ehang 184</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	1	N.A.	9843	54	100	16	106
<b><u>Volocopter 2X</u></b>	Electric	VTOL	450	2	2018	6562	27	160	27	N.A.
<b><u>Eviation Alice</u></b>	Electric	business aircraft	6349.8	9	2021	32 808	240	1250	1046	N.A.
<b><u>Wright Electric/Easy Jet</u></b>	Electric	Large commercial aircraft	N.A.	at least 120	2027	N.A.	N.A.	N.A.	539	3*260
<b><u>Extra aircraft/ Siemens Extra 330LE</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	1000.1	2	2016	9843	184 (top)	N.A.	N.A.	260



MODELOS DE PROPULSIÓN Y SU EVOLUCIÓN. Viabilidad de las energías renovables en el sector aeronáutico.

<b><u>Magnus Aircraft/Siemens eFusion</u></b>	hybrid diesel-electric	General Aviation/ recreational aircraft	600.1	2	N.A.	N.A.	100-130	N.A.	1100	60
<b><u>Solar Impulse 2</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	N.A.	1	N.A.	27887	38	N.A.	N.A.	N.A.
<b><u>Bye Aerospace Sun Flyer 2</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	861.8	2	N.A.	N.A.	55-135	363	N.A.	90
<b><u>Ampaire TailWind</u></b>	Electric	business aircraft	N.A.	9	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	161	N.A.
<b><u>Embraer Dreammaker</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	N.A.	2024	2,600-3,300	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b><u>Bell Nexus</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b><u>Boeing Sugar VOLT</u></b>	Hybrid-electric	Large commercial aircraft	N.A.	135	2030-2050	N.A.	N.A.	N.A.	6482	N.A.
<b><u>DigiSky SkySpark</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	N.A.	2	N.A.	N.A.	162 (top)	N.A.	500	65
<b><u>Hamilton aEro</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	420	1	2017	N.A.	92	N.A.	160	80
<b><u>Dufour aEro 2</u></b>	Electric	VTOL	N.A.	2	N.A.	N.A.	173	N.A.	120	N.A.
<b><u>PC Aero Elektra One Solar</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	300	1	N.A.	19600	76	100	600	32
<b><u>PC Aero Elektra Two Solar</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	450	2	N.A.	65616	37.8	200	almost unlimited	23
<b><u>PC Aero Elektra Solar Trainer</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	600	2	N.A.		76.6	260	400	32
<b><u>Volta Volare DaVinci</u></b>	Hybrid-electric	General Aviation/ recreational aircraft	N.A.	2+2	2017	24 000	160	N.A.	N.A.	N.A.
<b><u>Yuneec International E430</u></b>	Electric	General Aviation/ recreational aircraft	430	2	N.A.	9840	52	N.A.	N.A.	N.A.

